

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук Минстроя России»

На правах рукописи

Калайдо Александр Витальевич

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА РАДОНА В
СИСТЕМЕ СРЕД «ГРУНТ-АТМОСФЕРА-ЗДАНИЕ»**

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и
городского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент Н.В. Бакаева

Москва – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Радиационные аспекты экологической безопасности строительства.....	15
1.2 Современные подходы к ограничению облучения радоном в зданиях.....	18
1.3 Анализ результатов исследований современного состояния проблемы облучения радоном в зданиях.....	22
1.4 Выводы и постановка задач исследования.....	27
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДОНОВОГО БАЛАНСА ЗДАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ВИДА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	29
2.1 Модели диффузионного переноса.....	31
2.2 Модели конвективного переноса.....	41
2.3 Конвективно-диффузионные модели.....	48
2.4 Выводы.....	57
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	59
3.1 Оценка радоновой обстановки в зданиях равнинных территорий на примере города Луганска.....	59
3.2 Экспериментальное исследование процесса переноса радона через пористую среду (с внутренними распределенными источниками радона).....	69
3.2.1 Задачи экспериментального исследования.....	69
3.2.2 Описание физической модели и технических характеристик экспериментальной установки.....	72
3.2.3 Обоснование адекватности физической модели реальным условиям переноса радона.....	80
3.2.4 Содержание и результаты экспериментального исследования.....	82
3.3. Выводы.....	86

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАДОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗДАНИИ.....	88
4.1 Формулировка и решение краевой задачи переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание».....	88
4.2 Содержание и результаты модельного исследования.....	92
4.3 Методика проектного расчета радонозащитных характеристик горизонтальных подземных ограждающих конструкций.....	96
4.4 Выводы.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	120
Приложение А. Результаты гамма-спектрометрического исследования грунта с территории «Ясли-садик комбинированного типа № 55».....	119
Приложение Б. Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры.....	120
Приложение В. Длина и эффективный коэффициент диффузии радона в различных средах.....	122
Приложение Г. Математическая модель переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание».....	123
Приложение Д. Справка о внедрении результатов диссертационных исследований в учебный процесс.....	130
Приложение Е. Акт о внедрении результатов диссертационных исследований в учебный процесс кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Юго-Западного государственного университета.....	131

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

A – объемная активность радона, Бк/м³;

a_i – удельное поступление радона в единичный объем помещения, Бк/(м³·с);

C_{Ra} – удельная активность радия в грунте или материале ограждающей конструкции, Бк/кг;

D – коэффициент диффузии радона, м²/с;

D_e – эффективный коэффициент диффузии радона, м²/с;

d – половина ширины здания, м;

ELA – эффективная площадь натекания, м²;

F – коэффициент равновесия между радоном и дочерними продуктами распада;

G – объемная генерация радона в порах почвы, Бк/(м³·с);

H_x и H_y – размеры грунтового массива, м;

h – заглубление здания, м;

$I_{поч}$ – общее сопротивление почвы конвективному поступлению почвенного воздуха, Па·с/м³;

K – коэффициент радонопроницания материала или грунта, м/с;

k – воздухопроницаемость материала, м²;

$k_{эм}$ – коэффициент эманирования;

L – длина диффузии радона, м;

$N_{ср}$ – радоновая нагрузка на подземные ограждающие конструкции, Бк/м³;

P – давление воздуха, Па;

$q_{диф}$ – плотность диффузионного потока радона, Бк/(м²·с);

R – сопротивление радонопроницанию материала или грунта, с/м;

RLA – площадь натекания радона, м²;

S – площадь поверхности ограждающей конструкции, м²;

T – температура воздуха, К;

$T_{1/2}$ – период полураспада, с;

V – объем помещения, м³;

α – коэффициент газообмена на поверхности раздела фаз;

ε – пористость материала;

η – динамическая вязкость почвенного газа, Па·с;

λ – постоянная распада радона, с⁻¹;

λ_g – кратность воздухообмена в помещении, ч⁻¹;

P_{Rn} – радоновый потенциал грунта, Бк/м³;

ρ – плотность материала, кг/м³;

v – скорость диффузионного или конвективного потока почвенного газа, м/с.

ВВЕДЕНИЕ

Права человека на жизнь и здоровье гарантированы Конституцией Российской Федерации, а их реализация является важнейшей государственной задачей. Исходя из этого, безопасность человека должна быть обеспечена на всех этапах его жизнедеятельности и по всем возможным факторам риска, число которых непрерывно увеличивается по мере развития общества.

В настоящее время порядка 50% причин заболеваний обусловлены качеством окружающей среды, а поскольку современный человек проводит около 7 000 часов в год в зданиях, то создание безопасной внутренней среды является актуальной научно-прикладной задачей. Один из ее наиболее важных аспектов – обеспечение радиационной безопасности строящихся и эксплуатируемых зданий, поскольку негативное воздействие радиации в помещениях имеет место на протяжении всего жизненного цикла зданий, а не ограничивается первыми неделями с момента ввода их в эксплуатацию, как в случае с химическими вредными и опасными факторами. Как следствие, действие ионизирующих излучений не только причиняет значительный социальный и экономический ущерб, но и приводит к ухудшению генофонда населения Российской Федерации. Поэтому обеспечение радиационной безопасности объектов строительства является важнейшей задачей, отвечающей концепции сохранения генофонда населения Российской Федерации.

Не менее 2/3 средней эффективной эквивалентной дозы от всех источников ионизирующего излучения население в РФ и за рубежом получает от облучения радоном и его дочерними продуктами распада (ДПР), содержащимися в воздухе помещений. Облучение радоном официально признано вторым по тяжести фактором (после курения), приводящим к раку легкого, а сам радон отнесен к канцерогенам первой группы.

Большой вклад в изучение проблемы облучения населения радоном внесли исследования отечественных ученых Крисюка Э.М., Бекмана И.Н., Гулабянца Л.А., Жуковского М.В., Ярмошенко И.В., Уткина В.И., Кургуза С.А.,

Маренного А.М., Сидельниковой О.П., Яковлевой В.С., Васильева А.В., Цапалова А.А., Кувшинникова С.И. и др. Среди зарубежных авторов следует отметить работы, выполненные североамериканскими (Chen J., Cohen B.L, Moir D., Sherman M.H.), британскими (Darby S., Hill D.) западноевропейскими (Stoop P., Schmier H.), японскими (Tokonami S., Kávási N., Oikawa, S.), скандинавскими (Valmari T., Arvela H., Reisbacka H.) и другими учеными. Несмотря на различные направления исследований, все названные выше авторы отмечают серьезность проблемы облучения населения радоном в зданиях.

Требования ограничения величины облучения радоном в зданиях нашли отражение и в законодательстве Российской Федерации, а именно в Федеральных Законах № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» и № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». С целью их выполнения Нормами радиационной безопасности НРБ-99/09 и Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010 установлены предельные допустимые уровни эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов распада радона в воздухе помещений: 200 Бк/м³ для эксплуатируемых зданий и сооружений и 100 Бк/м³ – для строящихся и реконструируемых. Для зданий с длительным пребыванием людей (лечебные, учебные учреждения и т.п.) рекомендовано снижение ЭРОА до минимальной технологически обоснованной величины.

В существующих зданиях нормализация радоновой обстановки требует существенно больших затрат, чем обеспечение достаточной степени противорадоновой защиты при возведении объекта. Потому экономически более эффективны превентивные мероприятия, направленные на обеспечение требуемых радонозащитных свойств зданий на стадии проектирования. Противорадоновая защита может быть реализована с помощью пассивных или активных технологий. Первые подразумевают обеспечение достаточного сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций здания, вторые – удаление радона из помещения или уменьшение радоновой нагрузки на основание здания.

Материалы и конструктивные решения, используемые в современном строительстве, позволяют регулировать поступление радона в здания в широких пределах. Таким образом, не требующие обслуживания и затрат на эксплуатацию элементы пассивной защиты зданий от радона способны обеспечить достаточно низкие значения ЭРОА в помещениях зданий, возводимых практически на любых грунтах. Однако на данный момент достоверные методы проектного расчета поступления радона в здания отсутствуют, а критерии оценки радонозащитных свойств ограждающих конструкций не установлены. Следствием этого является введение в эксплуатацию объектов с недостаточными или с существенно избыточными радонозащитными свойствами.

Проектирование радонобезопасных и, в то же время, ресурсоэффективных зданий возможно только на основе теоретически обоснованных расчетных методов, связывающих между собой процессы образования радона в различных источниках с экспериментально установленными закономерностями его переноса к оболочке здания и через ограждающие конструкции. Опыт разработки строительных норм, накопленный в НИИСФ РААСН, ИПЭ УрО РАН и ряде других проектных институтов строительной отрасли, указывает на необходимость рассматривать здание в рамках единой системы, включающей в себя все элементы, оказывающие значимое влияние на нормируемый параметр.

Основной вклад в величину ЭРОА радона в помещениях нижних этажей зданий вносит поступление радона из грунтового основания через подземные ограждающие конструкции. Выделение радона из самих ограждающих конструкций является вторым значимым источником поступления радона в здания, также необходим учет поступления радона с атмосферным воздухом, имеющим отличную от нуля ЭРОА радона (поступления радона с водой и природным газом пренебрежимо малы). Таким образом, для прогнозирования радоновой обстановки в воздухе помещений необходимо рассматривать единую систему «грунт-атмосфера-здание». При этом, каждая из подсистем состоит из множества элементов, свойства которых могут изменяться в достаточно широких пределах. Многофакторный характер процесса формирования радоновой

обстановки в здании существенно ограничивает возможности его продуктивного натурального исследования.

Математическое моделирование более перспективно в плане описания многофакторных процессов и требует значительно меньших временных и материальных затрат, чем интерпретация результатов натуральных исследований. На данный момент разработано большое количество аналитических, численных и полуэмпирических моделей поступления радона в здания, однако ни одна из них не может в достаточной степени считаться адекватной реальным условиям. Причина тому – недостаточная изученность механизмов переноса радона в грунте и ограждающих конструкциях здания, а также многофакторность самого процесса переноса и сложность его точного математического описания. Поэтому уровень знаний в данной области не позволит в ближайшее время вести речь о создании универсальной модели, удовлетворяющей всему диапазону условий существования системы «грунт-атмосфера-здание». Более актуальна разработка моделей, адекватно описывающих процесс переноса радона в ограниченных условиях существования рассматриваемой системы.

Исходя из вышесказанного, *цель работы* состоит в развитии научного подхода к определению радонозащитных характеристик подземных ограждающих конструкций зданий на стадии их проектирования.

На основании цели в работе поставлены и решены следующие *задачи*:

- на основе анализа научной литературы грунт под зданием определен как основной источник поступления радона в воздух помещений нижнего этажа;
- теоретически обосновано доминирование диффузионного механизма переноса радона из грунтового основания в здание, подземные ограждающие конструкции которого не являются дефектными;
- экспериментально подтверждена актуальность решения проблемы ограничения облучения населения радоном на территориях, не относящихся к потенциально радоноопасным (на примере города Луганска);

- по результатам лабораторного эксперимента обоснована целесообразность введения «эквивалентного» коэффициента диффузии радона в материале, учитывающего влияние термодиффузии на перенос радона;

- разработана математическая модель переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание»;

- предложена методика определения оптимального сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций зданий на стадии их проектирования.

Научная новизна заключается в разработке методологического аппарата совершенствования технологии проектирования зданий с целью обеспечения их радоновой безопасности и определяется следующими результатами:

- впервые представлена математическая модель стационарного диффузионного переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание» в двухмерной постановке, учитывающая влияние термодиффузионных эффектов;

- получены результаты расчетов, демонстрирующие взаимосвязь основных параметров формирования радоновой обстановки в здании;

- предложена отличная от известных методика расчета радонозащитных характеристик подземных ограждающих конструкций зданий, позволяющая сравнивать до шести вариантов конструкции основания, включающего до шести слоев материалов с различными физическими характеристиками.

Теоретическая значимость работы:

- выполнен анализ результатов экспериментальных исследований уровней радона в зданиях, позволивший идентифицировать грунтовое основание как основной источник радона в воздухе помещений;

- по результатам анализа известных математических моделей поступления радона в здания обоснован диффузионный механизм переноса радона из грунтового основания в помещения нижнего этажа;

- показана целесообразность использования «эквивалентного» коэффициента диффузии радона при моделировании радоновой обстановки в здании;

- разработана математическая модель стационарного диффузионного переноса радона, рассматривающая грунт, атмосферу и здание как единую систему.

Практическая значимость работы:

- экспериментальное подтверждение значимости проблемы ограничения облучения радоном населения потенциально нерадоноопасных территорий;

- получение результатов расчетов, демонстрирующих взаимосвязь между параметрами, оказывающими влияние на поступление радона в здание;

- разработка программы для расчета подземных ограждающих конструкций зданий с позиций определения их оптимальных радонозащитных характеристик;

- результаты диссертационного исследования могут быть использованы в процессе преподавания дисциплин профессионального цикла для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению 8.03.01 и 8.04.01 «Строительство».

Методология включала в себя системный подход, абстрактно-логический и монографический методы. Из экспериментальных ***методов*** использовались эксперимент, сравнение и моделирование; из теоретических – идеализация, формализация и корреляционный анализ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- критерии определения потенциальной радоноопасности участка застройки;

- обоснование доминирующего механизма переноса радона из грунтового основания в здания;

- факторы, определяющие интенсивность поступления радона в здания;

- математическая модель переноса радона в системе «грунт-основание-здание»;

- результаты численного моделирования переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание»;

- методика определения радонозащитных свойств горизонтальных подземных ограждающих конструкций зданий на стадии проектирования.

Степень достоверности и апробация результатов работы основывается на использовании базовых гипотез теории массопереноса, а также подтверждается сопоставлением теоретических результатов, полученных с использованием разработанной математической модели, с экспериментальными данными натурных исследований, проведенных в Луганске. Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 7 Международных, всероссийских и региональных конференциях и симпозиумах: II Международной научно-практической конференции «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации» (г. Луганск, 28 сентября 2017 г.); Международной научной конференции VIII Академических чтениях, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», (г. Москва, 3-5 июля 2017 г.); I Международной научно-практической конференции «Современные экологические проблемы и пути их решения», посвященной юбилею Луганского национального аграрного университета (г. Луганск, 22-23 ноября 2016 г.); 8-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда» (г. Курск, 12 мая 2016 г.), II Международном семинаре «Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений» (г. Курск, 17 сентября 2015 г.); 4-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и строительном комплексах», посвященной 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ (г. Брянск 1–2 декабря 2015 г.); V Международном съезде ветеринарных фармакологов и токсикологов «Актуальные проблемы и инновации в современной ветеринарной фармакологии и токсикологии» (г. Витебск, 26-30 мая 2015 г.); Всеукраинской научно-практической интернет-конференции с

международным участием «Нові матеріали і перспективні технології, охорона праці і професійна освіта» (г. Луганск, 4 апреля 2014 г.).

Реализация результатов работы:

- результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск) при изучении дисциплин «Экологическая экспертиза строительных проектов» и «Биосферосовместимые технологии в строительстве», преподаваемых студентам по направлению подготовки 07.03.01 «Архитектура» и 08.03.01 «Строительство»; магистрантам по направлению подготовки 07.04.01 «Архитектура» и 08.04.01 «Строительство»;

- результаты диссертационного исследования используются в процессе преподавания дисциплин «Основы охраны труда» и «Охрана труда в отрасли» студентам Института торговли, обслуживающих технологий и туризма Луганского национального университета имени Тараса Шевченко, обучающимся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Профессиональное обучение» (по отраслям), «Технологическое образование», «Товароведение», «Гостиничное дело», «Туризм» и «Дизайн»;

- результаты диссертационного исследования получены в рамках выполнения фундаментальных научных исследований в НИИСФ РААСН по теме «Развитие теории метода расчета радонового режима здания как единой природно-техногенной системы» в рамках госзадания Минстроя России и РААСН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, из которых одна публикация в издании, входящем в международную реферативную базу Scopus и 8 печатных работ в специализированных профессиональных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 131 странице, из которой 101

страница основного текста. Работа содержит 23 рисунка, пять таблиц и шесть приложений. Список литературы состоит из 177 источников, из которых 81 на русском и 96 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору Лорену Арамовичу Гулабянцу за научную идею и постановку экспериментальных исследований в работе.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Радиационные аспекты экологической безопасности строительства

В современном обществе человек проводит в зданиях не менее 7000 часов в год, из которых 5000 часов приходится на жилые, и еще 2000 – на служебные (или учебные) помещения [1]. Не исключено, что при дальнейшем росте уровня урбанизации время пребывания человека в помещениях будет только увеличиваться. В таких условиях первоочередной задачей системы экологической безопасности строительства (ЭБС) становится создание комфортной и безопасной внутрижилищной среды как строящихся, так и эксплуатируемых зданий.

Необходимость решения задач ЭБС на принципах биосферной совместимости не вызывает сомнения у специалистов строительной отрасли. Прогрессивное развитие людей и среды их жизнедеятельности во взаимосвязи с развитием Биосферы положено в основу «Доктрины градоустройства и расселения (стратегического планирования городов)», разработанной в Российской академии архитектуры и строительных наук [2].

Степень экологической безопасности городской хозяйства определяется микроклиматом внутренней среды, световым режимом, уровнем шумов и вибраций, а также интенсивностью ионизирующих и неионизирующих излучений. В последние десятилетия во всем мире наблюдается устойчивая тенденция к ухудшению экологической ситуации в результате хозяйственной деятельности человека. Деграция экологических систем на урбанизированных территориях приводит к загрязнению природных ресурсов, снижению качества среды жизнедеятельности – как внешней, так и внутренней.

Разработка концепции биосферной совместимости дала толчок исследованиям в области экологической безопасности строительства. Но большая часть работ посвящена проблеме защиты природной среды от хозяйственной деятельности человека. В то же время, не менее важна и проблема защиты

человека от вредных воздействий природного и антропогенного характера. Речь, в первую очередь, идет о радиационной безопасности зданий, поскольку радиация является одним из наиболее опасных факторов, действующих на человека. К тому же, в отличие от прочих вредных и опасных факторов физической и химической природы, присутствующих в современном жилье, для ионизирующих излучений (ИИ) не доказано существование порога, ниже которого их действие не наносит вреда.

Действие ИИ характеризуется высокой эффективностью поглощенной энергии, наличием инкубационного периода, эффектом накопления доз и их влиянием на потомство, различной радиочувствительностью органов, значительной ролью индивидуальных особенностей организма и условий облучения. Физический, химический и биологический результат действия ИИ определяет плотность ионизации, степень загрязненности воздуха и распределением частиц пыли по размерам и т.д. [3; 4].

Источники ИИ по происхождению делятся на естественные и искусственные (антропогенные). Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиальной разницы, в обоих случаях процессы радиоактивных превращений протекают по одинаковым законам.

По расположению относительно организма источники ИИ делятся на внутренние и внешние. При расчете облучения от внешних источников учитывается только вклад гамма- и рентгеновского излучения, а во внимание не принимается действие альфа- и бета-излучения, поскольку жизненно важные органы находятся под слоем ткани на глубине более 2 см. Альфа- и бета-излучение формируют дозу внутреннего облучения, тогда как вкладом гамма-излучения можно пренебречь из-за малой величины линейной передачи энергии.

К антропогенным ИИ относят выбросы предприятий ядерно-топливного цикла, последствия испытаний ядерного оружия и медицинских обследований, в формирование дозы принимает участие 21 радионуклид, наибольший вклад имеют ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{144}Se [5].

К природным ИИ излучение естественных радионуклидов почв (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{97}Rb и ^{40}K) и радиоактивный газ радон с дочерними продуктами распада (ДПР). Дополнительный вклад в дозу облучения от естественных источников ИИ вносит космическое излучение, но он меньше двух первых составляющих.

Пока источники ИИ находятся в пределах Биосферы, они не несут вреда здоровью человека. Так, природный радиационный фон на территории РФ колеблется в пределах от 0,05 до 0,25 мкЗв/час, но даже в областях с аномально высоким уровнем радиационного фона не отмечено увеличения числа онкологических заболеваний. Аналогично, активность радона в атмосферном воздухе соответствует пренебрежимо малому риску возникновения рака легкого [6]. Но как только источники ИИ вовлекаются в хозяйственную деятельность человека, степень их опасности существенно возрастает. Радиоактивность пород перестает быть естественным источником с момента, как эти породы извлечены из недр и направлены на производство строительных материалов. Так же и радон становится крайне опасным, проникая в здания и накапливаясь в них. Таким образом, мы имеем дело с переходом природных источников в антропогенные (гамма-фон строительных материалов) или антропогенно усиленные природные (радон в зданиях).

Фундаментальные исследования различных аспектов проблемы облучения радоном выполнены Крисюком Э.М. [28] и Бекманом И.Н. [30], наиболее известными в области радиационной безопасности зданий на сегодняшний день следует признать работы московских ученых Гулабянца Л.А., Цапалова А.А., Кувшинникова С.И., Маренного А.М. и других [6; 19; 20; 24]; ученых ИПЭ УрО РАН Жуковского М.В., Ярмошенко И.В., Васильева А.В. [16-18] и др.; представителей сибирской научной школы Яковлевой В.С., Кургуза С.А., Андреева А.И. и других [25-27]. Радоновой проблеме посвящены работы, выполненные североамериканскими (Chen J., Cohen B.L, Moir D., Sherman M.H.), британскими (Darby S., Hill D.) западноевропейскими (Stoop, P., Schmier H.), японскими (Tokonami S., Kávási N., Oikawa, S.), скандинавскими (Valmari T., Arvela H., Reisbacka H.) и другими исследователями [31-36].

В настоящее время экспериментально установлено, что большую часть дозы современный человек получает в закрытых помещениях от естественных источников радиации [6-20], тогда как вклад искусственных ИИ в годовую дозу редко превышает 5-10% [21-23]. Радон с ДПР формирует не менее 50% годовой дозы облучения от всех источников ионизирующего излучения [37-39]; в ряде случаев его вклад может достигать до 70-75% [7-14]. Еще больший вклад в дозу отмечен в Ставропольском крае, Республиках Алтай и Тыва, Еврейском автономном округе [15; 40]. Однако для современного общества характерно недопонимание радоновой проблемы. Среди населения существует убеждение, что главную угрозу здоровью могут представлять только радиационные аварии и утечки радиоактивных отходов [7; 8].

Несмотря на столь значительный вклад в годовую эффективную дозу облучения населения, радон и его дочерние продукты распада относятся к управляемой компоненте радиационного ущерба, которая может быть существенно снижена посредством реализации соответствующих технических и организационных мероприятий.

1.2 Современные подходы к ограничению облучения радоном в зданиях

Радон – химический элемент с порядковым номером 86 нулевой группы периодической системы, строение электронной оболочки атома $6s^2 6p^6$, один из наименее распространенных элементов на Земле. Благородный радиоактивный одноатомный газ без цвета и запаха, не имеющий стабильных изотопов и образующийся в семействах урана, тория и актиния. Естественными изотопами являются ^{222}Rn (радон), ^{220}Rn (торон), ^{219}Rn (актинон) и короткоживущий ^{218}Rn , входящий в побочную ветвь семейства урана с коэффициентом ветвления $2 \cdot 10^{-7}$ [41].

Основной радионуклид ^{222}Rn с плотностью $9,73 \text{ кг/м}^3$ и периодом полураспада $T_{1/2} = 3,82$ суток образуется в семействе ^{238}U и имеет 10 ДПР (рисунок 1.1), из которых опасность для здоровья представляют лишь короткоживущие излучатели ^{218}Po (RaA), ^{214}Pb (RaB) и ^{214}Bi (RaC).

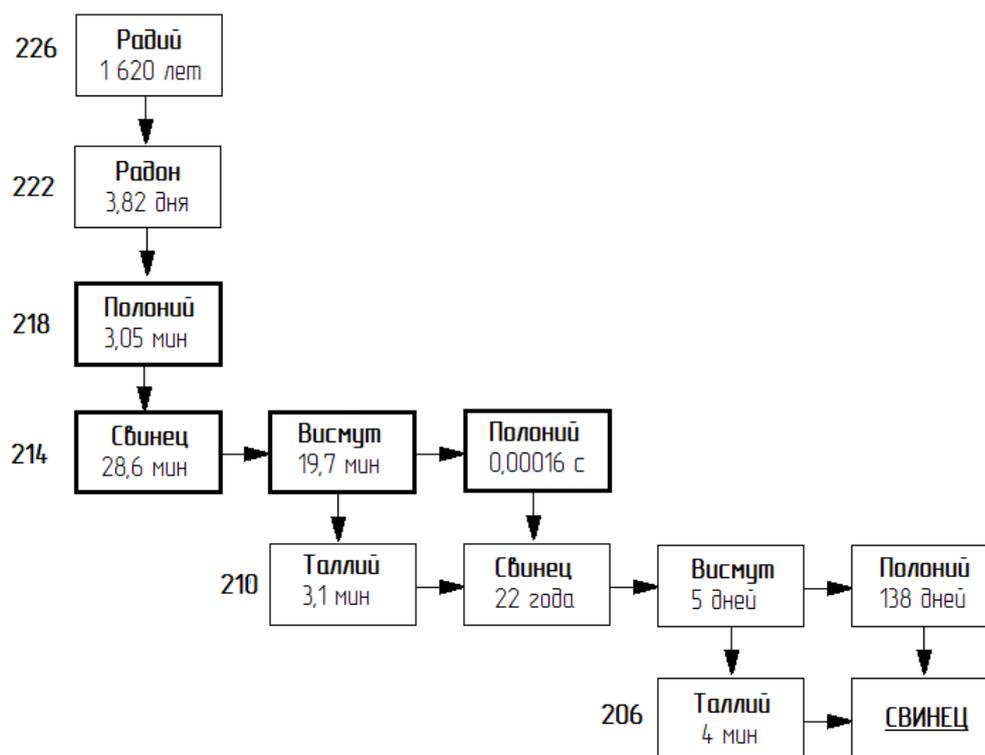


Рисунок 1.1 – Дочерние продукты распада радона: вертикальные стрелки соответствуют альфа-распадам, а горизонтальные – бета-распадам

Изотоп ^{220}Rn (торон) – продукт превращений семейства тория, при нормальных условиях имеет плотность $9,82 \text{ кг/м}^3$ и период полураспада $T_{1/2} = 54,5 \text{ с}$ [42], из-за которого не успевает существенно мигрировать от источника образования. Дозу облучения тороном также формируют короткоживущие альфа-излучатели, из которых более 90% (6,78 МэВ) выделяется при образовании ^{212}Pb (ThВ) в процессе альфа-распада ^{216}Po (ThА) [43]. Суммарный вклад всех ДПР торона (^{216}Po (ThА), ^{212}Pb (ThВ), ^{212}Bi (ThС), ^{212}Po (ThС') и ^{208}Tl (ThС'')) не превышает 8% от годовой дозы облучения ДПР радона [44-46].

Изотоп ^{219}Rn (актинон) с плотностью $9,77 \text{ кг/м}^3$ и периодом полураспада $T_{1/2} = 3,96 \text{ с}$ является результатом превращений в семействе актиния. За столь малое время он успевает мигрировать лишь на несколько миллиметров от места образования, потому его вклад во внутреннее радоновое облучение пренебрежимо мал [47].

Доза облучения легких формируется не столько радонами, а его ДПР, адсорбированными на частицах, содержащихся в воздухе помещений.

Значительная их часть осаждается в дыхательных путях легких и, не успевая вывестись из-за малого $T_{1/2}$, формирует дозу в легочных тканях [48]. Большая часть дозы облучения воспринимается клетками в бронхиальном и бронхиолярном отделах легких, доза на альвеолярный отдел значительно ниже [49-50].

Радон быстро приходит в равновесие с ДПР (за полное равновесие принимается 10 периодов полураспада дочернего изотопа), его содержание определяется *эквивалентной равновесной объемной активностью* (ЭРОА) – объемной активностью газообразного радона в равновесии с его короткоживущими ДПР, имеющей такую же удельную потенциальную энергию альфа-излучения, как и существующая неравновесная смесь. Во внимание принимаются только ДПР радона и торона

$$\text{ЭРОА}_{Rn} = 0,105 \cdot RaA + 0,515 \cdot RaB + 0,380 \cdot RaC, \quad (1.1)$$

$$\text{ЭРОА}_{Tn} = 0,913 \cdot ThB + 0,087 \cdot ThC. \quad (1.2)$$

Суммарная активность всех изотопов в воздухе помещений

$$\text{ЭРОА} = \text{ЭРОА}_{Rn} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{Tn}. \quad (1.3)$$

Единицей ЭРОА является Бк/м³ – активность, при которой за 1 с в 1 м³ происходит один акт распада радиоактивного вещества.

Поступление радона в здания происходит из почвы, строительных материалов, воды из скважин, природного газа и с атмосферным воздухом [51]. Среднемировое значение ЭРОА радона на открытом воздухе около 10 Бк/м³ [52], в воздухе помещений – ЭРОА 37 Бк/м³ [53], но в отдельных помещениях может она быть выше в сотни-тысячи раз. В [74] найдено следующее распределение источников поступления радона в помещения по мощности: почва под зданием – 41,7 Бк·ч/м³; атмосферный воздух – 5,0 Бк·ч/м³; природный газ – 0,3 Бк·ч/м³; вода – 0,1 Бк·ч/м³, еще 6,4 Бк·ч/м³ добавляют строительные материалы [54-55]. Данное распределение может изменяться в зависимости от конструкции зданий, типов коренных пород и т.д., но оно позволяет сделать вывод, что при моделировании радоновой ситуации в помещении достаточно ограничиться учетом поступления радона из почвы, строительных материалов и с наружным воздухом.

Грунт под зданием является главным источником поступления радона, перенос почвенного газа в здания осуществляется посредством диффузии и/или конвекции [25; 75-77]. Радиоактивность грунтов вызвана наличием радионуклидов семейств ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U и ^{40}K , еще 30% радиоактивных изотопов попадает в почву вместе с атмосферными осадками. В итоге грунт формирует до 90% дозы от ДПР радона, аномальные концентрации радона в десятки тысяч Бк/м³ имеют место в воздухе домов над радоновыми тектоническими зонами [56-59]. Интенсивность поступления радона из грунта зависит от целого ряда факторов геологической и метеорологической природы, условий эксплуатации здания, конструкции его основания и т.д.

Требования ограничения величины облучения радоном в зданиях нашли отражение и в законодательстве Российской Федерации, а именно в Федеральных Законах «О радиационной безопасности населения» [165] и «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [166]. С целью их выполнения Нормами радиационной безопасности НРБ-99/09 [84] и Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010 [53] установлены предельные допустимые уровни эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов распада радона в воздухе помещений: 200 Бк/м³ для эксплуатируемых зданий и сооружений и 100 Бк/м³ – для строящихся и реконструируемых. С целью исполнения требований НРБ-99/09 и ОСПОРБ-99 для строящихся зданий предусмотрены следующие предпроектные и проектные исследования:

- измерение уровня мощности эквивалентной дозы (МЭД) на участке застройки (допустимые значения не превышают 0,15 мкЗв/ч);
- измерение содержания ЕРН в строительных материалах (допустимые значения эффективной удельной активности $A_{эф}$ не превышают 370 Бк/кг);
- измерение уровня плотности потока радона (ППР) на участке застройки (допустимые значения не превышают 80 мБк/(м²·с)).

Первые два норматива установлены для защиты населения от γ -излучения, поэтому даже при их соблюдении ЭРОА радона в воздухе помещений может

существенно превышать 200 Бк/м³. В итоге, единственным критерием радоноопасности территории застройки является плотность потока радона (ППР), измеренная «мгновенно» в случайный момент времени и чаще всего – с поверхности почвы, а не на глубине закладки фундамента.

Задачей инженерно-экологических изысканий является заключение о достаточности степени радоновой защиты здания в рамках обычного проекта, а в противном случае – определение конкретного содержания дополнительных мероприятий по противорадоновой защите. В то же время, величина ППР, являясь чисто технической характеристикой, даже при достаточно точном определении (также весьма проблематичном ввиду ее зависимости от целого ряда достаточно переменных факторов геологической и микроклиматической природы) не дает исходных данных для проектирования. Использование величины ППР в качестве критерия радоноопасности территории зачастую приводит к введению в эксплуатацию зданий и сооружений с недостаточными или избыточными радонозащитными характеристиками и, как следствие, неоправданным затратам на инженерно-экологические изыскания, строительство и реконструкцию. Очевидно, что исследование исключительно радиационно-геологических характеристик участка застройки не решает задачи обеспечения требуемых уровней радона в воздухе помещений.

1.3 Анализ результатов исследований современного состояния проблемы облучения радоном в зданиях

В последнее время в научной литературе публикуется достаточно много результатов измерения уровней радона в жилых и служебных помещениях определенных территорий. Наибольшее внимание радоновой проблеме в мире уделяется в Скандинавских странах (ввиду значительной радоноопасности территорий), где уже более 20 лет реализуются национальные и региональные программы по снижению уровней радона в зданиях. Так, в Финляндии ужесточение санитарных норм позволило снизить на 33% (до 58 Бк/м³) среднегодовой уровень ЭРОА радона в воздухе 1500 новых малоэтажных домов

по сравнению с такими же, возведенными ранее [34]. В Чехии используется комплексный подход к оценке уровней радона в отдельных зданиях, основанный на изучении механизмов переноса радона из почвы путем одновременных измерений содержания радона в помещениях и в почвенном воздухе [60].

В богатой гранитами области Гварда в Португалии при исследовании 185 помещений в течение 2 месяцев разброс значений ЭРОА радона составил 75 – 7640 Бк/м³ со средним геометрическим 640 Бк/м³. Для оценки среднегодовой ЭРОА использовалась модель зимне-летнего изменения, согласно которой средний уровень радона по провинции составил 860 Бк/м³ (эффективная доза 15 мЗв/год), что значительно выше, чем в среднем по Португалии [61].

Концентрации радона в 93 жилых помещениях Пениццола Сорентина в Южной Италии измерялась на протяжении года в спальнях и гостиных, при этом уровень радона изменялся от 25 до 722 Бк/м³ со средним значением 132 ± 114 Бк/м³ и средней эффективной дозой в 2,4 мЗв/год [62]. В районе Пунч Пакистана исследования 80 гостиных и спален на протяжении 3 месяцев зафиксировали изменения ЭРОА радона от 27 до 196 Бк/м³ в гостиных и от 27 до 191 Бк/м³ в спальнях, с МЭД от ДПР радона в интервале от 0,78 до 4,00 мЗв/год [63]. В жилых помещениях Пенджаба и Химачал Прадеш среднегодовая ЭРОА радона изменялась в пределах 114 – 400 Бк/м³ со средней величиной 194 Бк/м³, при этом 22% жилых помещений ЭРОА находились в интервале 200 – 300 Бк/м³, а в 11% помещений выше 300 Бк/м³ [64]. Среднегодовая эффективная доза составила 4,88 мЗв, а максимальные значения наблюдались в плохо проветриваемых помещениях.

В Индийских Гималаях измерения в жилых домах проводились при помощи парного дозиметра радона, регистрирующего отдельно радон, торон и их ДПР. ЭРОА радона изменялось от 11 до 191 Бк/м³, торона – от 1 до 156 Бк/м³, фактор равновесия между радоном и ДПР от 0,02 до 0,90 со средней величиной 0,26 [65]. В штате Ойо на юго-западе Нигерии исследования радона в результате полугодичных исследований уровней радона в спальнях и гостиных 77 домов средняя ЭРОА составила 259 ± 67 и 255 ± 47 Бк/м³ соответственно; годовая доза

облучения – 6,5 и 6,4 мЗв/год соответственно; риск рака легкого – $2,52 \cdot 10^{-5}$ и $2,48 \cdot 10^{-5}$ соответственно. Достаточно высокий уровень радона объясняется геофизическими особенностями территории [66].

Измерения в помещениях 20 сельских областей в Турции в течение восьми последовательных месяцев показали изменение ЭРОА в пределах от 11 до 727 Бк/м³ со средним геометрическим 63 ± 2 Бк/м³ и среднегодовой эффективная доза 1,95 мЗв/год [67], что ниже рекомендованного МКРЗ уровня действия. Уровни радона и торона в 117 жилых помещениях Виннипега, измеряемые в течение 3 месяцев, составили $112 \pm 2,07$ Бк/м³ и $21 \pm 2,53$ Бк/м³ соответственно. При этом в 20% виннипегских домов отмечено превышение национального уровня в 200 Бк/м³, а сам Виннипег имеет самую высокую ЭРОА радона в воздухе помещений среди всех канадских городов [68].

Измерений уровней радона и торона в домах старой и новой постройки были выполнены в Венгрии, параллельно в них исследовался уровень гамма-излучения [69]. Мощность дозы от ДПР радона составила 0,83 мЗв/год в старых и 0,17 мЗв/год в новых помещениях, вклад ДПР торона не превышал 5%; мощность дозы гамма-излучения строительных материалов для старых и новых домов составила 0,19 и 0,12 мЗв/год соответственно.

В Корее в рамках национальной программы было выполнено обследование 1100 жилых помещений, в ходе которого среднее геометрическое ЭРОА для радона составило $49,0 \pm 1,9$ Бк/м³, для торона – $10,7 \pm 2,9$ Бк/м³, причем уровни радона в усадьбах были значительно выше, чем в квартирах. Средние мощности экспозиционных доз для радона и торона составили 1,65 и 0,17 мЗв/год соответственно, обнаружена корреляция их ЭРОА в воздухе помещений с содержанием их материнских радионуклидов в почве [70].

В целом, значительное количество исследований во многих странах посвящено радону в жилищах, тогда как изучение радоноопасности служебных помещений эпизодично и ограничивается специфическими рабочими местами: пещерами [71], тоннелями, шахтами [72], учебными учреждениями [73-75].

В Квебеке при радиологическом обследовании 65 начальных школ на соответствие национальному контрольному уровню в 200 Бк/м^3 средняя ЭРОА составила 56 Бк/м^3 , была установлена ее связь с геологическими особенностями территорий [73]. В аналогичном исследовании 80 школ Азад Кашмира в Пакистане детекторы на протяжении 90 дней размещались на высоте $0,9 - 1,5 \text{ м}$ в зависимости от среднего роста учеников, средняя ЭРОА радона составила $78 \pm 5 \text{ Бк/м}^3$, при этом МЭД от облучения радоном и его ДПР равнялась $0,63 \pm 0,04 \text{ мЗв/год}$ [74].

В Греции 77 школах префектуры Ксанти определялась «истинная» концентрация радона, учитывающая только время присутствия в школе преподавателей и учеников. За 2 недели измерений она составила 104 Бк/м^3 , тогда как средняя ЭРОА была в семь раз выше [75].

Ряд работ посвящен сравнению уровней радона в жилых и служебных помещениях определенной территории. В Финляндии было проведено более 500 измерений ЭРОА радона в жилье и на рабочих местах, геометрическое среднее в них составило 68 и 20 Бк/м^3 , соответственно [76]. В США при исследовании офисов и жилищ одной области средние концентрации радона составили 55 и 18 Бк/м^3 соответственно [77]. В Мексике уровни радона на 288 рабочих местах оказались существенно ниже, чем в жилых помещениях той же территории [78]. В Японии в 705 служебных помещениях, разбитых на четыре категории (школа, офис, больница и фабрика), ЭРОА радона составила 21 Бк/м^3 , тогда как в жилых помещениях она равна 16 Бк/м^3 [79].

Наибольший сравнительный анализ был проведен с 2007 по 2009 г. в Тоскане (Центральная Италия) в 1541 жилом и 1159 рабочих помещениях с показавший хорошую корреляцию между уровнями радона в домах и на рабочих местах [80]

$$ЭРОА_{рм} = 1,14 \cdot ЭРОА_{жил}, \quad (1.4)$$

где $ЭРОА_{рм}$ – активность радона на рабочих местах, Бк/м^3 ;

$ЭРОА_{жил}$ – активность радона в жилых помещениях, Бк/м^3 .

Вариации концентраций радона на рабочих местах составили 20%, а в жилищах 13%, что объяснялось большей разнородностью типов рабочих помещений и особенностей их использования. Измерения на протяжении трех лет уровней радона в расположенных на первых этажах рабочих помещениях показали вариацию ЭРОА от 20 до 5 000 Бк/м и значительные колебания уровней радона во времени.

Анализ структуры годовой эффективной коллективной дозы населения Российской Федерации показывает повышенную радоноопасность территории Республики Алтай и Республики Тыва, Ставропольского и Забайкальского края, Еврейского АО и ряда других субъектов РФ [81-82]. Годовая эффективная доза облучения населения в них существенно превышает 5 мЗв/год и практически полностью обусловлена ингаляционным поступлением радона, торона и их ДПР [81]. Столь высокие дозы облучения объясняются тем фактом, что данные регионы относятся к области горно-складчатых сейсмически активных зон разломов, являющихся своеобразными каналами поступления богатого радоном почвенного воздуха к дневной поверхности [83]. Кроме того, высокое содержание радона в домах на ряде указанных территорий связано с повышенным содержанием радия в подстилающих породах.

Однако высокие уровни радона в воздухе зданий и сооружений отмечены и на территориях, не относящихся к потенциально радоноопасным. Так, годовая доза жителя Беларуси от природных источников радиоактивных излучений составляет 2,2 мЗв, что почти в 10 раз превышает Чернобыльский вклад (0,25 мЗв), обусловленный загрязнением ^{137}Cs [8]. В среднем по Украине доза облучения населения источниками излучения естественного происхождения составляет 3,35 мЗв/год, 72% из которых обусловлены радоном и его ДПР [85].

Оценка радоноопасности эксплуатируемых зданий с постоянным пребыванием людей в Москве показала, что в 48,5% помещений годовая доза от облучения ДПР радона находится в интервале 2,5-5 мЗв, а в 6% - превышает 5 мЗв [86]. На территории Санкт-Петербурга, также не относящейся к потенциально радоноопасной, зарегистрировано превышение установленных уровней в южной

части города, вызванное высокой газопроницаемостью диктионемовых сланцев, хотя для них характерна низкая удельная активность радия [82].

Подобная проблема отмечена и для ряда других равнинных асейсмичных территорий. Так, в 15% обследованных зданий Иркутска уровни радона превышают установленные нормы, а для 5% квартир рассчитанная годовая доза превышает значение 10 мЗв [87]. В Ленинском районе Оренбурга среднегодовая ЭРОА радона составила 158,5 Бк/м³ для помещений первых этажей и 178,2 Бк/м³ для цокольных этажей [88], высокие уровни радона отмечены на территории Брянской области [89]. Кроме того, по многим областям отсутствуют данные радиационно-экологического мониторинга, либо представленные данные противоречивы.

Анализ результатов исследований уровней радона в помещениях показывает, что подавляющее большинство исследователей не рассматривает источники и механизмы поступления радона в здания – основной задачей таких исследований является оценка среднегодовой ЭРОА (или ОА) в воздухе помещений. В то же время, разработка эффективных мероприятий по снижению концентрации радона в помещении возможна только при условии понимания особенностей переноса радона через ограждающие конструкции зданий.

Также следует отметить, что на территориях с повышенной радиоактивностью или зонами активной микрогеодинамики высокие уровни радона в зданиях подтверждены многочисленными исследованиями. В то же время, все чаще фиксируется значительное превышение установленных контрольных уровней возможно и на потенциально нерадоноопасных равнинных территориях с невысоким содержанием радия в коренных породах. Однако данные результаты требуют экспериментального подтверждения ввиду отсутствия системного мониторинга радоновой обстановки на всей территории Российской Федерации.

1.4 Выводы и постановка задач исследования

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы;

1. Главным источником радона в воздухе помещений является почвенный воздух, поступающий из геологического пространства под зданием. При этом максимально эффективны те противорадоновые мероприятия, что реализуются в непосредственной близости от источника поступления радона.
2. Облучение радоном в зданиях, формирующее большую часть годовой дозы облучения населения, может быть снижено повышением сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций зданий.
3. Важнейшим аспектом обеспечения радоновой безопасности зданий является понимание механизма переноса радона через подземные ограждающие конструкции здания, поскольку каждому из них соответствует свой комплекс противорадоновых мероприятий.
4. В ряде исследований отмечается превышение установленных контрольных уровней в зданиях потенциально нерадоноопасных регионов РФ.

На основании проведенного анализа состояния проблемы облучения населения радоном в помещениях сформулированы следующие задачи дальнейшего исследования:

1. Обосновать доминирующий механизм переноса радона из грунтового основания в здание через подземные ограждающие конструкции, оказывающие эффективное сопротивление радонопроницанию.
2. Оценить значимости проблемы облучения населения радоном на территориях, не относящихся к потенциально радоноопасным (на примере города Луганска).
3. Экспериментально исследовать влияние перепадов температур и давлений на границах горизонтальной подземной ограждающей конструкции на интенсивность поступления радона в помещения нижнего этажа.
4. Разработать математическую модель переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание», с ее помощью установить значимость и направление действия основных факторов, влияющих на поступление радона в здания.
5. На базе математической модели разработать методику определения оптимального сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций зданий на стадии их проектирования.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДОНОВОГО БАЛАНСА ЗДАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ВИДА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Перенос радона из источника образования в воздух помещения является комплексным процессом, подверженным воздействию множества факторов. Разнонаправленность их действия и отсутствие возможности инструментального контроля отдельных из них часто не позволяют получить достоверную информацию о радоновой ситуации в здании. Более того, при проведении натурных исследований важная информация об особенностях процесса накопления радона в помещении может не только остаться скрытой в массе результатов, но и быть неверно интерпретирована.

Математическое моделирование также не в состоянии в полной мере отобразить все многообразие физических процессов с момента образования радона до его поступления в воздух помещения. Однако математическое моделирование многофакторного процесса переноса радона позволит определить направления действия и значимости факторов, влияющих на уровень концентрации радона в здании, что практически невозможно в условиях натурных экспериментов любой продолжительности.

Объектом моделирования радонового баланса является концентрация радона (ОА или ЭРОА) в воздухе помещений, сама же математическая модель должна не только объяснять наблюдаемые уровни радона, но и предлагать новые направления исследований. Основными задачами математического моделирования радоновой обстановки в помещениях являются:

- прогнозирование концентрации радона в помещении конкретного здания, оценка факторов, оказывающих влияние на радиационную обстановку;
- совершенствование методик и процедур проведения натурных исследований;
- разработка эффективных мероприятий по снижению уровней радона.

По способу решения представленных выше задач все модели поступления радона в здания можно разделить на три типа:

- *аналитические* – позволяют получить явные зависимости искомых величин от входных параметров для идеализированных геометрических форм на основании ряда упрощающих предположений;

- *численные* – искомые величины получаются в результате использования конечно-разностных, конечно-элементных и других численных методов решения дифференциальных уравнений. Позволяют получить только частную информацию относительно искомых величин, поскольку для реализации требуют задания значений всех параметров, входящих в уравнение;

- *полуэмпирические* – в математическое соотношение входят параметры, значения которых определяются на основании закономерностей, установленных в процессе натурных исследований.

В отдельный тип можно выделить модели с сосредоточенными параметрами, в которых реальная сплошная система представляется более простой дискретной. Однако подобные модели не получили широкого распространения в моделировании поступления радона в здания.

По числу координат, используемых при описании процесса переноса, все математические модели разделяются на одно-, двух- и трехмерные.

На начальном этапе моделирования определяются источники поступления радона в воздух помещений. Как было показано в предыдущей главе, таковыми являются граничащие со зданием воздушная и геологическая среды, а также материалы ограждающих конструкций, а поступление радона с водой и природным газом пренебрежимо мало. Почвенный газ – основной источник радона в помещении [90-95], он представляет эффективную бинарную смесь с пренебрежимо малой концентрацией радона в «фоновом» воздухе (при активности почвенного воздуха в $40\,000\text{ Бк/м}^3$ мольная доля радона составляет $7,6 \cdot 10^{-16}$ при 20°C) [96]. Вторым по мощности источником радона практически всегда являются строительные материалы, кроме того необходимо учитывать и его поступление с атмосферным воздухом, имеющим ненулевую активность радона [97].

На следующем этапе моделирования определяются механизмы и движущие силы поступления радона. Перенос бинарной смеси в грунте и материалах ограждающих конструкций может осуществляться диффузией (концентрационной, термической или барической), конвекцией или комбинацией этих механизмов [55; 98]. Установление доминирующего механизма поступления радона является ключевым вопросом при разработке математической модели, адекватной реальным условиям поступления радона в здания. В соответствии с доминирующим механизмом устанавливаются пути поступления радона в здания. Параллельно с накоплением радона в воздухе помещений реализуются и механизмы уменьшения активности, вызванные воздухообменом и радиоактивным распадом радона. Одновременный учет процессов накопления и распада радона позволяет построить уравнение радонового баланса для конкретного помещения.

2.1 Модели диффузионного переноса

Изначально здания с высокими концентрациями радона в воздухе помещений были выявлены в районах с повышенным содержанием радия в почвах [99]. Применение для нормализации радоновой обстановки противорадоновых мероприятий, не связанных с заделкой путей поступления радона в здания на этих территориях оказалось эффективным [100-103], что утвердило диффузионную модель поступления радона в помещения. В различное время диффузия признавалась доминирующим механизмом поступления радона в частное жилье Западной Европы и США [104-112], а также в современные многоэтажные здания в РФ [113].

Диффузия радона из грунтового основания в здания вызвана существенной разностью концентраций радона в почвенном воздухе (десятки-сотни кБк/м³) и воздухе помещений (десятки-сотни Бк/м³). При этом на процесс переноса радона могут оказывать влияние градиенты температуры и давления.

Наиболее простые модели учитывают исключительно диффузионное поступление радона из материалов ограждающих конструкций. Общее выражение

для такого случая предложено Крисюком [28] и Scott [99]

$$a_{\text{диф}} = \frac{\sum_{j=1}^n q_j S_j}{V}, \quad (2.1)$$

где $a_{\text{диф}}$ – скорость поступления радона в воздух помещения, Бк/(м³·с);

q_j – плотность диффузионного потока радона с j -ой поверхности, Бк/(м²·с);

S_j – площадь j -ой поверхности, м²;

V – объем помещения.

Выражение для плотности потока радона в строительном материале (или в грунте) имеет вид [28]

$$q = C_{Ra} \rho k_{эм} \cdot \sqrt{\frac{\lambda D_e}{\varepsilon}} \cdot \tanh\left(\frac{h}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda \varepsilon}{D_e}}\right), \quad (2.2)$$

где C_{Ra} – удельная активность радия, Бк/кг;

ρ – плотность материала, кг/м³;

$k_{эм}$ – коэффициент эманирования;

D_e – эффективный коэффициент диффузии, м²/с;

ε – пористость;

h – толщина слоя материала, м.

Необходимость замены бинарного коэффициента диффузии D на эффективный D_e обусловлена тем, что в реальной пористой среде поры не являются прямолинейными, а потому увеличивается средняя длина пути из одной точки в другую

$$D_e = \frac{\varepsilon}{\beta} D, \quad (2.3)$$

где β – извилистость.

В случае влажной пористой среды выражение для эффективного коэффициента диффузии приобретает следующий вид [114]

$$D_e = \frac{(\varepsilon_a + K_T \varepsilon_w)}{\beta} \cdot D, \quad (2.4)$$

где ε_a и ε_w – газовая и водная пористости;

K_T – коэффициент разделения радона между газовой и водной фракциями.

В работе [125] предложен подход к определению величины плотности потока радона из строительных материалов, основанный на измерении объемной активности радона в два последовательных момента времени при переходе помещения из активного режима эксплуатации в стационарный

$$q = [Q(t_2) - Q(t_1) \cdot e^{-\lambda \Delta t_{21}}] \cdot \frac{\lambda V}{S} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta t_{21}}}, \quad (2.5)$$

где $Q(t_1)$ и $Q(t_2)$ – значения ОА радона в начале и конце герметизации ($Q(t_2) > Q(t_1)$), Бк/м³;

Δt_{21} – время между измерениями, ч.

Поскольку объемная активность A радона в воздухе помещения определяется процессами накопления и «стока» радона, то простейшее уравнение радонового баланса имеет вид

$$\frac{dA}{dt} = a_{\text{диф}} - A(\lambda + \lambda_g), \quad (2.6)$$

где λ_g – скорость воздухообмена в помещении, с⁻¹.

Решение уравнения (2.6) при начальном условии $A(0) = A_0$ позволяет найти равновесную ОА радона в помещении ($t \rightarrow \infty$)

$$A = \frac{a_{\text{диф}}}{\lambda + \lambda_g} + A_0. \quad (2.7)$$

Поскольку в реальном помещении воздухообмен всегда имеет место ($\lambda_g \gg \lambda$), то (2.7) приобретает вид

$$A = A_0 + \frac{a_{\text{диф}}}{\lambda_g}. \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) позволяет достаточно точно оценить только поступление радона из материалов ограждающих конструкций, но оно не учитывает поступления радона из грунтового основания здания.

Развитие данный подход получил в работе Гулабянца [115], в которой правая часть (2.7) дополнена слагаемым, учитывающим поступление радона из грунтового основания здания ($A_0 = 0$)

$$A = \frac{a_{\text{диф}}}{\lambda + \lambda_{\text{г}}} + \frac{q_n S_n}{V(\lambda + \lambda_{\text{г}})}, \quad (2.9)$$

где q_n – плотность потока радона из грунта через граничащую с ним горизонтальную ограждающую конструкцию, Бк/(м²·с);

S_n – площадь граничащей с грунтом конструкции пола, м².

Формула для определения величины q_n впервые была приведена в работе Olsson-Jonsson [116]

$$q_n = \frac{\Delta A}{R}, \quad (2.10)$$

где ΔA – разность ОА радона на границах горизонтальной подземной ограждающей конструкции, Бк/м³;

R – сопротивление радонопроницанию конструкции, с/м.

В работах Гулабянца и др. [117-119] определены величины в правой части (2.10). Разность объемных активностей авторы полагают приблизительно равной радоновому потенциалу грунта в основании здания

$$\Delta A \approx C_{Ra} \rho k_{\text{эм}}, \quad (2.11)$$

а также определяют сопротивление радонопроницанию:

- для однослойной конструкции

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{\lambda D}} \cdot sh \left(h \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right), \quad (2.12)$$

- для двухслойной конструкции

$$R_2 = \frac{L_2}{D_2} \cdot ch \left(\frac{h_1}{L_1} \right) sh \left(\frac{h_2}{L_2} \right) + \frac{L_1}{D_1} sh \left(\frac{h_1}{L_1} \right) ch \left(\frac{h_2}{L_2} \right) \quad (2.13)$$

где h_1 и h_2 – толщина верхнего и нижнего слоя, м;

D_1 и D_2 – коэффициент диффузии радона в материале верхнего и нижнего слоя, м²/с;

L_1 и L_2 – длина диффузии радона в материале верхнего и нижнего слоя, м, определяемая по формулам

$$L_1 = \sqrt{\frac{D_1}{\lambda}}, \quad L_2 = \sqrt{\frac{D_2}{\lambda}}. \quad (2.14)$$

Чаще всего радонозащитные свойства подземной ограждающей конструкции определяются двумя слоями с наибольшим сопротивлением радонопроницанию (бетон и гидро-газоизолирующий слой), поэтому данный подход может быть использован для определения требуемых радонозащитных свойств конструкций проектируемого здания.

Другой подход к моделированию диффузионного поступления радона в помещения основан на решении уравнения диффузии. Диффузионный поток $q_{диф}$ в основном определяется градиентом объемной активности радона ∇A , также на его величину могут влиять градиенты температур ∇T (термодиффузия) и давлений ∇P (бародиффузия) смеси [120]

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -q_{диф} = D \nabla \left(\nabla A + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_P}{P} \nabla P \right), \quad (2.15)$$

где k_T и k_P – безразмерные коэффициенты термо- и бародиффузии, соответственно;

D – коэффициент диффузии бинарной смеси, $\text{м}^2/\text{с}$.

Эффекты бародиффузии на практике совершенно незначительны [120], поэтому при типичных перепадах давлений в 2-5 Па на границах подземной горизонтальной ограждающей конструкции третье слагаемое в (2.15) пренебрежимо мало. Термодиффузия может играть ощутимую роль лишь при значительных температурных градиентах, существенно различной массе компонентов смеси и средних концентрациях компонентов, что одновременно не имеет места в реальных условиях поступления радона в здания. В то же время, Minkin в [121-123] указывает на необходимость включения термодиффузионного потока радона в математические модели наряду с потоком концентрационной диффузии

$$q_{диф} = q_d + q_t = -D \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{DQA}{kT^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.16)$$

где q_d и q_t – плотность потока концентрационной и термической диффузии, $\text{Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана,

Q – теплопередача, Дж.

Однако в работах других исследователей термодиффузионный механизм переноса радона не получил подтверждения, поэтому значимость эффектов термодиффузии (как и бародиффузии) нуждается дополнительной в экспериментальной проверке.

В предположении незначительности термодиффузионных эффектов уравнение (2.15) принимает вид закона концентрационной диффузии (закона Фика), который лежит в основе большинства моделей, описывающих перенос радона и его поступление в здания

$$q_{\text{диф}} = -D\nabla A \quad (2.17)$$

где ∇A – градиент объемной активности радона, вызванный разностью активностей радона в почвенном воздухе и воздухе помещения, Бк·м⁻³/м.

Решение (2.17) для одномерного случая представлено Telford [124] в предположении, что концентрация радона на поверхности равна нулю, а на глубине l постоянна и равна A_0

$$A = A_0 \cdot \exp\left[\frac{(l-r)v}{2D}\right] \cdot \frac{\sinh\left(r \cdot \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{\lambda}{D}}\right)}{\sinh\left(l \cdot \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{\lambda}{D}}\right)}, \quad (2.18)$$

где $v = 10^{-6}$ м/с – скорость диффузионного потока, м/с;

r – расстояние от поверхности, м.

Предложенное решение описывает перенос радона в грунте, оно также позволяет найти концентрацию радона в воздухе помещения при замене подстилающей поверхности и основания здания условным однородным слоем с эквивалентными характеристиками. Однако оно не учитывает генерацию радона в грунтовом массиве под зданием и не рассматривает влияние здания на поле концентрации радона в грунте.

В ряде моделей концентрация радона в воздухе помещений связывается с параметрами воздухообмена. Жуковский и др. [126-127] в предположении мгновенного перемешивания радона по всему объему помещения получают

дифференциальное уравнение, связывающее ОА радона с кратностью воздухообмена (КВО) в данном помещении

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{амм}) \cdot \lambda_g(t) - (A(t) - A_{амм}) \cdot \lambda, \quad (2.19)$$

где $S(t)$ – временная зависимость удельного поступления радона в единичный объем помещения, Бк/(м³·ч);

$\lambda_g(t)$ – функция, описывающая зависимость КВО от времени, ч⁻¹;

$A_{амм}$ – ОА радона в атмосферном воздухе, Бк/м³.

Для стационарного режима эксплуатации помещения в предположении постоянства скорости поступления радона и КВО, а также малости постоянной распада радона по сравнению с КВО ($\lambda_g \gg \lambda$) авторы получают решение уравнения (2.19) в виде

$$A(t) = \frac{S_0}{\lambda_0} + \left(A_0 - \frac{S_0}{\lambda_0} \right) \cdot e^{-\lambda_0 t}, \quad (2.20)$$

где S_0 – удельное поступление радона в единичный объем помещения, Бк/(м³·ч);

λ_0 – КВО при стационарном режиме эксплуатации помещения, ч⁻¹.

Для нестационарного (реального) режима авторы в предположении ступенчатого изменения КВО получают решение уравнения (2.19)

$$A(t) = \frac{1}{6} e^{-\lambda_0 t} (W - e^{-2kt} (W - 1))^{\frac{\lambda}{2k}} \times \left[S_0 \lambda_0^2 t^3 + 3S_0 \lambda_0 t^2 + S_0 \lambda t^2 (W - 1) (2kWt - 2\lambda_0 t + \lambda t (W - 1) - 3) + 6S_0 t + 6A_0 e^{-\lambda N} W^{-\frac{\lambda}{2k}} \right], \quad (2.21)$$

где N – продолжительность проветривания, ч;

$k = 50$ – коэффициент подъема при времени перехода между состояниями порядка 5 мин;

W – величина, определяемая по формуле

$$W = \frac{1}{e^{2N+1}}.$$

Данная модель разработана для определения КВО в помещении по результатам анализа кривых накопления радона, однако она может быть

использована и для решения обратной задачи. В то же время, достоверное определение КВО в эксплуатируемых зданиях проблематично, а в проектируемых – невозможно, что существенно ограничивает область использования модели.

Павлов представил упрощенную формулу для определения средней ОА в помещении первого этажа при отсутствии радонозащиты здания [128]

$$A = A_{амм} + \frac{(q + 4q_{см}) \cdot T \cdot 10^{-3}}{H}, \quad (2.22)$$

где q – плотность потока радона с поверхности грунта под зданием, мБк/(м²·с);

$q_{см}$ – плотность потока радона с поверхности строительных материалов, мБк/(м²·с);

T – время одного воздухообмена (7200 с при кратности воздухообмена 0,5 ч⁻¹), с;

H – высота помещения, м.

Все рассмотренные выше модели имеют весьма ограниченную область применения в связи с целым рядом принимаемых допущений, Расширение области адекватности диффузионных моделей возможно лишь в рамках подхода, разработанного в НИИ СФ РААСН Гулабянцем и др. и в ИПЭ УрО РАН Жуковским и др. Суть подхода состоит в рассмотрении подстилающего грунта и самого здания как единой системы, состоящей из ряда взаимодействующих подсистем. Системное рассмотрение процесса формирования радоновой обстановки вызвано тем, что заглубленная часть здания оказывает влияние на профиль поля концентрации радона в почвенном воздухе в окрестности здания.

Жуковский и др. в [29] рассматривают два блока почвы, примыкающие к вертикальной и горизонтальной подземным ограждающим конструкциям. В предположении однородности почвы и постоянной концентрации в ней радона авторы получают аналитическое решение стационарного одномерного уравнения диффузии радона

$$D_e \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \lambda A + \rho k_{эм} C_{Ra} \lambda \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (2.23)$$

представляющее собой профили распределения концентрации радона в этих областях, а также в фундаментной стене и фундаментной плите. Такой подход позволяет определить плотности диффузионных потоков радона:

- на внутренней стороне боковой стены фундамента

$$q_c(z) = \frac{\varepsilon_{\bar{\sigma}} L_{\bar{\sigma}}}{sh\left(\frac{d_c}{L_{\bar{\sigma}}}\right)} \cdot \left(G_{\bar{\sigma}} \cdot \left[1 - ch\left(\frac{d_c}{L_{\bar{\sigma}}}\right) \right] - \lambda C_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{L_n}} \right) \right); \quad (2.24)$$

- на внутренней стороне фундаментной плиты

$$q_{nl}(z) = \frac{\varepsilon_{\bar{\sigma}} L_{\bar{\sigma}} G_{\bar{\sigma}} \cdot \left[\frac{L_{\bar{\sigma}} \varepsilon_{\bar{\sigma}}}{L_n \varepsilon_n} \cdot sh\left(\frac{d_{nl}}{L_{\bar{\sigma}}}\right) + ch\left(\frac{d_{nl}}{L_{\bar{\sigma}}}\right) - 1 \right]}{sh\left(\frac{d_c}{L_{\bar{\sigma}}}\right) + \frac{L_{\bar{\sigma}} \varepsilon_{\bar{\sigma}}}{L_n \varepsilon_n} \cdot ch\left(\frac{d_{nl}}{L_{\bar{\sigma}}}\right)} + \frac{L_n \varepsilon_n G_n}{\frac{L_n \varepsilon_n}{L_{\bar{\sigma}} \varepsilon_{\bar{\sigma}}} \cdot sh\left(\frac{d_{nl}}{L_{\bar{\sigma}}}\right) + ch\left(\frac{d_{nl}}{L_{\bar{\sigma}}}\right)}, \quad (2.25)$$

где $L_{\bar{\sigma}}$ и L_n – длина диффузии радона в бетоне и почве, соответственно, м;

$\varepsilon_{\bar{\sigma}}$ и ε_n – пористость бетона и почвы, соответственно, м;

$G_{\bar{\sigma}}$ и G_n – скорость образования радона в бетоне и почве, соответственно, Бк/(м³·с);

C_{∞} – максимальная концентрация радона в почвенном воздухе, Бк/м³;

d_c и d_{nl} – толщина стены и плиты, соответственно, м;

Гулабянцем и др. в [129-130] разработана математическая модель на основе системы уравнений двумерного стационарного диффузионного переноса радона в грунте

$$D_s \left(\frac{\partial^2 A_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_s}{\partial y^2} \right) - \lambda_{Rn} \cdot A_s(x, y) + \Pi_{Rn} \lambda_{Rn} = 0, \quad (s = 1, 2), \quad (2.26)$$

где $s = 1, 2$ – обозначают заглубленную часть здания и граничащий с ним грунт соответственно;

D_s – коэффициент диффузии радона, м²/с;

Π_{Rn} – радоновый потенциал грунта, зависящий от удельной активности радия, Бк/м³.

Модель учитывает образование радона в почвенном массиве и материале ограждающих конструкций

$$W_s = C_{Ra,s} \rho_s k_{эм,s} \lambda, \quad (2.27)$$

где $C_{Ra,s}$ – удельная активность радия в грунте или материале ограждающих конструкций, Бк/кг;

$\rho_{сп,s}$ – плотность данного материала, кг/м³;

$k_{эм,s}$ – коэффициент эманирования радона для данного материала.

Аналитическое решение уравнения (2.26) получено в виде

$$A(x, y) = \frac{W_s}{\lambda} \left(1 - N_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D_s}} y} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (p_n(s) \cos(u_n(s)(x - a_1(s)) (R_n e^{v_n(s)(y-b_1(s))} + e^{-v_n(s)(y-b_1(s))}) + q_n(s) \cos(u_n(s)(y - a_2(s))) \cdot ch(v_n(s)(x - b_2(s))), \quad (2.28)$$

где $p_n(s)$ и $q_n(s)$ – неопределенные коэффициенты, которые находятся путём замены рядов в уравнении (2.28) конечными суммами.

Выражение (2.28) позволяет определить концентрации радона в любых параллельных координатным осям плоскостях при различном заглублении и ширине здания. Знание характера распределения и величины радоновой нагрузки необходимо для расчёта требуемого сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций здания.

В работе [130] подземная часть здания представлена в виде радононепроницаемой среды. Решение системы (2.26) показывает, что вертикальный профиль поля концентрации радона в плоскости контакта вертикальной конструкции с грунтом практически не отличается от аналогичного в отсутствие здания. Это позволяет пренебречь поступлением радона в здание через вертикальные подземные ограждающие конструкции, так как они не препятствуют разгрузке радона в атмосферу.

Также условия диффузионного переноса зависят от физических свойств среды в окрестности здания (влажности, коэффициента эманирования и т.д.), которые не остаются постоянными. Поэтому для учета подобных изменений в работах [131, 132] авторами предложено введение условного «эквивалентного» коэффициента диффузии. Например, Климшин и др. в [131] предлагает использовать его для описания промерзания грунта

$$D(z, t) = D_1 - (D_2 - D_1) \cdot \chi(z - h(t)), \quad (2.29)$$

где D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии радона в грунте до и после промерзания, $\text{м}^2/\text{с}$;

$\chi(z)$ – функция Хевисайда.

Глубина промерзания грунта $h(t)$ аппроксимируется соотношением

$$h(t) = \frac{h_{\max} \cdot t}{T} (\chi(t) - \chi(t - T)) + h_{\max} \chi(t - T), \quad (2.30)$$

где T – время установления максимальной глубины промерзания, ч.

Аналогично, Лившиц и др. обосновывают целесообразность введения «эквивалентного» коэффициента диффузии радона, который позволит учесть возможное влияние термо- и бародиффузионных эффектов на процесс его переноса [132].

В большинстве случаев диффузионный перенос в большинстве случаев достаточно точно описывает наблюдаемые потоки радона из почв и строительных материалов, однако он в состоянии объяснить наблюдаемые высокие концентрации радона в помещениях на потенциально нерадоноопасных территориях.

2.2 Модели конвективного переноса

В конце 1970-х годов в ряде стран были обнаружены дома, расположенные на почвах со средним и низким содержанием радия, в которых ОА радона превышала $750 \text{ Бк}/\text{м}^3$ [133]. Такие концентрации не могут быть объяснены с позиций диффузионного поступления, поэтому был разработан новый подход, использующий законы конвективного (адвективного) переноса. Позднее конвективный механизм поступления радона в здания был назван доминирующим декларацией Агентства по охране окружающей среды США (US EPA) [121].

Движущей силой конвективного переноса радона в пористой среде выступает отрицательная разность давлений в помещении и грунте под зданием ($\sim 1\text{-}5 \text{ Па}$). Чаще всего она индуцируется более низкой наружной температурой (стек-эффект), также перепады давления может создавать ветровая нагрузка и использование систем вытяжной вентиляции.

Модели, описывающие конвективное поступление радона в здания, используют либо характеристики грунтового основания, либо конструктивные характеристики зданий. В основе первого подхода лежит использование закона Дарси, согласно которому скорость конвективного переноса флюида v определяется соотношением

$$v = -\frac{k}{\eta} \nabla P \quad (2.31)$$

где k – воздухопроницаемость среды, м^2 ;

η – динамическая вязкость почвенного газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

∇P – градиент давлений, $\text{Па}/\text{м}$.

Закон Дарси в форме (2.31) справедлив при числах Рейнольдса $Re < 1 \dots 4$, что имеет место для всех материалов с проницаемостью ниже 10^{-8} м^2 при перепадах давлений не более 50 Па [134].

Основы моделирования конвективного поступления радона в здания разработаны Nazaroff. Объединяя (2.31) с уравнением неразрывности и полем давлений $p(x, y, z)$ в почве и решая полученное уравнение для заданной геометрии при соответствующих граничных условиях, автор определяет объемное поступление радона в здания [135]. Nazaroff и Sextro в [136] представили полуаналитический подход расчета поступления радона в заглубленный цилиндр с горизонтальной осью, что является идеализацией поступления радона в здание через щели в соединении пол-стена или по периметру вводов канализационной системы. Вычисляемое в модели время движения от поверхности по цилиндру соответствует скорости поступления радона в здание.

Mowris и Fisk в [137] использовали данный подход при определении потока почвенного газа в подвал через трещины в плите основания под действием перепада давлений. В предположении однородности и изотропности почвы авторы используют биполярные координаты для определения поля давлений и потока почвенного газа в полость по аналогии с задачей теплопроводности для горизонтального цилиндра, погруженного в полубесконечную среду. Численное решение данной задачи представлено Loureiro и др. [138-140], разработавшими

трехмерную модель поступления почвенного газа и радона через трещины в основании дома, расположенного на грунтовом блоке. При этом геометрия дома предполагалась симметричной относительно двух ортогональных горизонтальных осей, что позволяет моделировать только один квадрант рассматриваемой системы. Однако данная схема содержит строгие геометрические ограничения и применима только для моделирования стационарных задач.

Аналитические решения показали важность влияния трещин на сопротивление конструкции радонопроницанию, также были получены результаты для потока радона в дома, расположенные на почвах с различной проницаемостью, при использовании систем вентиляции. Однако концентрации радона в полости не были получены, так как аналитическое решение уравнений переноса радона даже при этих упрощающих предположениях не было найдено.

Gadsby и др. в [141-143] использовали аналитическую модель, моделирующую радиальный потока газа в неглубоком цилиндрическом слое гравия, ограниченном между двумя непроницаемыми дисками с отсасыванием в центре. Кольцо почвы, окружающей цилиндр гравия, необходимо для определения влияния грунта в области засыпки при депрессии. Результаты показали существенное влияние проницаемостей гравийной засыпки и грунта вокруг стен основания на интенсивность поступления радона в здание.

Широкое распространение в моделировании конвективного поступления радона в здания получили численные конечно-разностные модели. В них происходит преобразование дифференциального уравнения в разностное, основанное на дискретизации пространства (и, если это применимо, – времени). Затем неизвестные переменные поля определяются в узлах сеток и выражаются в виде набора связанных разностных уравнений (обычно первого порядка). На основе данного метода Hintenlang и др. [144] из закона Дарси определили поток радона при использовании систем вентиляции основания здания, построенного на низкопроницаемых грунтах. Narasirnhan и др. [145] применили интегрированный метод конечных разностей для моделирования поступления радона в подвалы при изменении барометрического давления. Было найдено, что из-за отставания в

распространении импульса давления в почву в подвальном этаже имеет место «накачивающий» эффект, приводящий к усиленному поступлению почвенного газа, богатого радоном.

Данный подход получил развитие в работах Revzan и др. [146-148], где авторы использовали данную модель для описания поступления радона в дома с полноразмерными подвалами и исследования влияния ряда вторичных эффектов на ОА радона в здании. Установлено, что наличие гравия под плитой пола способно увеличивать скорость поступления радона через зазор по периметру плиты и стены до 5 раз. Сопротивление радонопроницанию зазора становится существенным при его ширине меньше 0,001 м для почвы с проницаемостью 10^{-11} м². Проницаемость гравия становится важной при проницаемости почвы выше 10^{-10} м², значительно меньшую роль играют толщина слоя гравия и содержание в нем радия. Размеры и количество отверстий в плите основания имеют относительно небольшое значение до тех пор, пока их общая площадь очень мала по сравнению с площадью плиты. В бетонно-блочных конструкциях возможно поступление радона через трещины в стене при наличии воздушного зазора между наружной стороной стены и почвой.

В целом, конечно-разностные методы обеспечивают удовлетворительное согласие с результатами натурных исследований в отдельных домах, они легко реализуемы и понятны, однако они создают повышенную вычислительную нагрузку при моделировании геометрии реальных зданий.

Упрощенный подход к моделированию конвективного поступления, разработанный Scott для домов с высокой концентрацией радона, использует для определения ОА радона в помещении следующее выражение [99]

$$A = \frac{A_{поч} \cdot \Delta P}{I_{поч} \cdot V_{уд}}, \quad (2.32)$$

где $A_{поч}$ – концентрация радона в почвенном газе в основании здания, Бк/м³;

ΔP – перепад давлений, вызывающий конвективный поток, Па;

$I_{поч}$ – общее сопротивление почвы конвективному переносу почвенного воздуха, Па·с/м³;

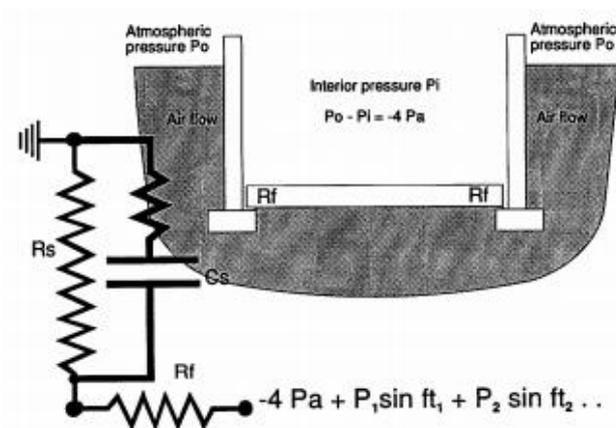
V_{y0} – скорость поступления воздуха, м³/с.

Rogers и др. в [149-150] установили, что $A_{поч}$ сложным образом зависит от содержания радия в почве, размеров ее зерен и влажности. При этом средняя удельная активность 40 Бк/кг соответствует ОА радона в почвенном газе приблизительно в 80 кБк/м³. Revzan и др. в [144] определяют $I_{почв}$ исключительно как функцию проницаемости почвы k

$$I_{почв} = \frac{7,2 \cdot 10^{-7}}{k}. \quad (2.33)$$

В ряде работ для моделирования конвективного потока радона в зданиях используется метод электрических аналогий, в котором перепад давлений, вызывающий поток почвенного газа, представляется напряжением, поток газа – током. Подобные модели удобны для прогнозирования скорости поступления почвенного газа и радона при различных реальных движущих силах (депрессия от ветровой нагрузки, разности температур или работы механической вентиляции) [93]. Однако использование в качестве аналогии цепей постоянного тока не позволяет получить необходимого согласия между теоретическими и экспериментальными результатами.

Более сложная эквивалентная схема предложена Scott в [99], в ней почва представлена в виде RC-цепи (рисунок 2.1), импеданс которой моделирует сопротивление почвы потоку воздуха. Скорость поступления радона, согласно данной модели, имеет вид



$$Q = C_{почв} \cdot \sum_{f=0}^{\infty} \frac{P(f)}{I_{почв}(f)}, \quad (2.34)$$

где $P(f)$ – средняя разность давлений на границах ограждающей конструкции при частоте изменения атмосферного давления f , Па.

Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема сопротивления почвы [99]

В данной модели сопротивление почвы потоку воздуха рассматривается как переменная величина, зависящая от скорости изменения давления dP/dt . Поскольку импеданс цепи уменьшается при любом изменении входного напряжения (перепада давлений), то данная модель дает более высокие скорости конвективного поступления радона, чем модели, описывающие поступление радона при постоянном перепаде давлений ΔP .

Второй подход к моделированию конвективного поступления радона в здания состоит в использовании таких характеристик конструкции здания как эффективная площадь натекания ELA и площадь натекания радона RLA, высота нейтрального уровня и т.д.

Наибольшее распространение получили модели, определяющие перепад давлений как следствие разности температур внутри и снаружи здания (стек-эффект). В работе Arvela [151] данный подход использовался при изучении сезонных вариаций уровней радона в жилье. Модель конвективного поступления радона, используемая в Финском Центре радиационной и ядерной безопасности, связывает перепад давлений с разностью температур внутреннего $T_{внут}$ и наружного $T_{нар}$ воздуха с высотой нейтрального уровня H_0 , на которой достигается равенство давлений внутри и снаружи здания

$$\Delta P = \rho_0 g H_0 \cdot \frac{T_{внут} - T_{нар}}{T_{внут}}, \quad (2.35)$$

где ρ_0 – плотность воздуха при нормальном давлении, кг/м³;

$g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

Основы использования для описания конвективного поступления радона в здания величин ELA и RLA разработаны Sherman и др. в Берклиевской лаборатории. В [98] Sherman использует для определения скорости поступления радона выражение

$$A = \frac{A_{ноч} \cdot ELA \cdot v_0}{V} \cdot \left(\frac{T_{внут} - T_{нар}}{T_{внут}} \cdot \frac{gH}{P_0} \right)^{n_r}, \quad (2.36)$$

где H – высота здания, м;

v_0 – скорость инфильтрации воздуха, м/с;

ELA – эффективная площадь натекания, м²;

n_r – характеристика мест инфильтрации и эксфильтрации воздуха в здании.

Инфильтрационная модель, предложенная в [152-153], учитывает поступление радона не только вследствие стек-эффекта, но и по причине ветровой нагрузке на здание

$$V_{y\partial} = ELA \cdot \sqrt{(f_s (T_{нар} - T_{внут})^{0,65})^2 + (f_w v)^2}, \quad (2.37)$$

где v – скорость ветра, м/с;

f_s и f_w – стек-параметр и ветровой параметр.

Для моделирования конвективного поступления радона с использованием данной модели необходимо задать долю воздухообмена, приходящуюся на наружный воздух и почвенный воздух (или воздух, поступающий из подпольного пространства). Однако в большинстве исследований указывается на незначительность ветровой нагрузки как фактора формирования радоновой обстановки в здании.

В Докладе НДКАР ООН [154] также используется доля почвенного воздуха в общем объеме конвективного поступления

$$a_{кон} = A_{поч} \varphi \lambda_v, \quad (2.38)$$

где φ – доля почвенного воздуха в общем воздухообмене;

$A_{поч}$ – объемная активность радона в почвенном воздухе, Бк/м³;

λ_v – скорость воздухообмена в помещении, с⁻¹.

Аналогичным образом определяется инфильтрационное поступление радона с наружным воздухом

$$a_{атм} = A_{атм} f \lambda_v, \quad (2.39)$$

где $A_{атм}$ – объемная активность радона в атмосферном воздухе, Бк/м³;

f – доля наружного воздуха в общем воздухообмене.

Если рассмотренная выше величина ELA является характеристикой инфильтрационных процессов, то используемая Sherman в [152-153] площадь натекания радона объединяет в себе большинство факторов, влияющих на

сопротивление поступлению радона с почвенным воздухом. Поток радона в здание связан с RLA соотношением

$$Q_{Rn} = C_{\infty} \cdot RLA \cdot \sqrt{\frac{2P_0}{\rho_0}} \cdot \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right)^{n_r}, \quad (2.40)$$

где ρ_0 – плотность воздуха при нормальном давлении, кг/м³;

n_r – коэффициент, зависящий от распределения мест инфильтрации и эксфильтрации в здании.

Основным недостатком подхода, использующего ELA и RLA для описания конвективного поступления радона в здания, является сложность определения данных величин.

Проведенный анализ моделей конвективного поступления показал, что изменение парадигмы в описании поступления радона в здания, утвердившее конвективный механизм в качестве доминирующего, не привело к прогрессу в вопросе обеспечения радоновой безопасности зданий. Обзор многочисленных несоответствий и противоречий предсказаний моделей конвективного переноса и экспериментальных результатов выполнен Minkin в [121-122], в работах [100-103] экспериментально подтверждена неэффективность заделки трещин и стыков в граничащих с грунтовым основанием конструкциях, в целом ряде работ отмечено отсутствие увеличения поступления радона в здания в более холодные периоды года.

Таким образом, можно считать несостоятельной гипотезу о том, что конвективный механизм является безусловно доминирующим при формировании радоновой обстановки в здании.

2.3 Конвективно-диффузионные модели

Сложности в описании поступления радона в здания с позиций чисто диффузионного или конвективного механизма переноса, наряду с развитием численных методов, привели к разработке обобщенных моделей поступления радона. Чаще всего такие модели суммируют вклады диффузионного и конвективного поступлений радона в помещения.

Наиболее полный учет всех факторов формирования радоновой обстановки в здании выполнен Жуковским и др. в [29]. В предположении диффузионного поступления радона из грунтового основания и строительных материалов, конвективного поступления под действием стек-эффекта, ветровой нагрузки и работы вытяжной вентиляции, конвективного поступления из-за флуктуаций атмосферного давления и инфильтрационного поступления с атмосферным воздухом авторы получают следующее выражение для объемной активности радона в помещении

$$A = \frac{C_{\infty} k v_0 \cdot RLA \cdot \left[X_S \frac{\Delta T}{T_1} \right]^n + \sum_{j=1}^n \frac{q_j S_j}{\lambda_g V}}{v_0 \cdot ELA \cdot \left[\left[Y_S \frac{\Delta T}{T_1} \right]^n + Y_W \right]} + A_{amm}, \quad (2.41)$$

где ΔT – разность температур внутри и снаружи помещения, К;

C_{∞} и A_{amm} – объемная активность радона в почвенном воздухе на глубине нескольких метров и в атмосферном воздухе, соответственно, Бк/м³;

X_S , Y_S и Y_W – коэффициенты, характеризующие конструктивные особенности здания.

Данная модель позволяет определить доминирующий механизм поступления радона в здание: при доминировании конвекции с увеличением ΔT числитель в (2.41) растет быстрее знаменателя и ОА радона в помещении для зимнего сезона оказывается выше, чем для летнего; в противном случае концентрация радона в здании в холодный период будет ниже, чем в теплый. Однако в модели использовано большое количество параметров различной природы, точные значения которых неизвестны. По этой причине данная модель не может быть использована для количественной оценки уровней радона в помещениях зданий.

Модель, представленная Jelle в [95], рассматривает инфильтрационный и конвективный перенос, диффузионное поступление радона из грунта и строительных материалов, а также детально описывает конструктивные особенности здания

$$A = \frac{1}{1 + D_a \cdot \frac{S_{амм}}{\lambda_g V} + v \cdot \frac{S}{\lambda_g V} + (D + q\Delta P) \cdot \frac{S_{зр}}{\lambda_g V}} \times$$

$$\times \left[\left(1 + D_a \cdot \frac{S_{амм}}{\lambda_g V} \right) \cdot A_{амм} + v \cdot \frac{S}{\lambda_g V} \cdot A_M + (D + q\Delta P) \cdot \frac{S_{зр}}{\lambda_g V} \cdot A_{зр} \right], \quad (2.42)$$

где A_M – концентрация радона в материале ограждающей конструкции, Бк/м³;

$A_{зр}$ – концентрация радона в почвенном газе, Бк/м³;

D_a – коэффициент диффузии радона из наружного воздуха внутрь помещения, т.е. через стены и крышу, м/с;

D – коэффициент диффузии радона через основание здания, м/с; v – коэффициент эксхалляции радона строительными конструкциями, м/с;

q – воздухопроницаемость почвы, м³/(м²·гПа);

ΔP – перепад давлений между подпольем и нижним этажом, Па;

$S_{амм}$ – площадь помещения, граничащая с атмосферой, м²;

S – площадь внутренних ограждающих конструкций, м²;

$S_{зр}$ – площадь помещения, граничащая с почвой, м².

Главным недостатком данной модели также является сложность достоверного определения значений входных параметров.

В наиболее простом случае вклад конвективной составляющей в объемную активность радона в помещении выражается только через инфильтрационные характеристики здания

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n q_j S_j}{V \lambda_b} + A_{зр} \varphi + A_{амм} f, \quad (2.43)$$

где φ и f – доля в общем воздухообмене почвенного и наружного воздуха, соответственно.

Al-Ahmady и др. в рамках данной модели предложил для определения скорости конвективного и инфильтрационного поступления следующие эмпирические соотношения [155]

$$R_{кон} = 13,32 \Delta P_{зр}; \quad R_{инф} = 1,07 \Delta P_{амм}, \quad (2.44)$$

тогда как диффузионное поступление принималось постоянным в интервале 3-10 Бк/с. При этом разности давлений определялась разностью температур внутри и снаружи здания

$$\Delta P = P_0 \cdot \frac{mgh}{k} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}, \quad (2.45)$$

где h – высота, измеренная от нулевого уровня, м;

m – масса молекулы воздуха ($4,82 \cdot 10^{-26}$ кг при 20°C);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Модель достаточно точно описывает суточную динамику изменения давления, вызванного изменением наружной температуры, и предлагается авторами для интеграции в более сложные модели конвективно-диффузионного поступления, в которых величина ΔP является входным параметром. В то же время, модель предсказывает циклический характер суточной динамики радона, не подтвержденный большинством натуральных исследований.

Бухаревым и др. разработана методика прогнозирования ОА радона в воздухе помещений на основе моделирования процессов воздухообмена в здании [156]. При этом здание представляется сложной аэродинамической системой, состоящей из многочисленных путей, по которым перемещается воздух, и источников энергии, вызывающих это перемещение. Математическое описание процесса представлено в виде системы уравнений, состоящей из уравнения перепадов давлений для каждого участка системы, уравнения расходов для каждого узла сети и равенства потерянного и переданного в сеть давления для каждого контура сети. Решение данной системы позволяет получить значения кратностей воздухообмена в помещениях, а также объемы инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха. Объемная активность радона в помещении определяется заданием скорости поступления радона из основных источников.

Данная математическая модель учитывает конструктивные и объемно-планировочные решения здания, однако определение ОА радона в помещении производится с использованием заданных скоростей поступления радона, которые не могут быть получены из результатов других исследований, поскольку зависят

от целого ряда конструктивных особенностей объекта.

Все рассмотренные выше модели основаны на учете конструктивных особенностей зданий, тогда как модели, использующие характеристики сред, в которых происходит перенос радона, основываются на уравнении конвективно-диффузионного переноса радона

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \nabla D \nabla A - v \nabla A - \lambda A + G, \quad (2.46)$$

где первое слагаемое описывает диффузию, второе – адвекцию, третье и четвертое – распад и генерацию радона соответственно.

В большинстве случаев моделирование поступления радона в воздух помещений производится с использованием коммерческих программ различной степени сложности. Так, Kohl и др. [157] используют программу FRACTure, связывающую стационарный вид уравнения (2.46) с законом Дарси и уравнением Лапласа

$$\frac{l}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{k}{\eta} \nabla P \right) = v, \quad \nabla \left(\frac{k}{\eta} \nabla P \right) = 0. \quad (2.47)$$

Система решалась методом конечных элементов, численная модель дискретизировалась лагранжевыми элементами на расстоянии 50 см. В работе использовалась цилиндрическая модель здания радиусом 5 м, глубиной заглубления 1,5 м и толщиной основания 0,3 м. Грунтовый массив имел глубину 15 м и радиус 20 м для исключения граничных эффектов, депрессия подвала по отношению к грунтовому основанию изменялась в пределах от -5 до -10 Па, а проницаемость грунта – от 10^{-14} до 10^{-11} м². Результаты моделирования сопоставлялись с результатами измерений уровней радона в горных районах Швейцарии, в домах без сплошного фундамента, построенных на высокопроницаемых карстовых юрских известняках (вследствие низкого сопротивления радонопроницанию уровни радона в таких домах достигали 10 000 Бк/м³) [158; 159].

Результаты моделирования показали несущественность адвективного потока по сравнению с диффузионным поступлением. Однако при более высоких

проницаемостях адвекция начинала играть более важную роль в переносе радона в здание (таблица 2.1), становясь доминирующим механизмом поступления в дома, имеющие низкое сопротивление радонопроницанию.

Таблица 2.1 – Зависимость концентрации радона в помещении (Бк/м³) от проницаемости грунта под зданием и разности давлений [158; 159]

	10^{-14} м^2	10^{-13} м^2	10^{-12} м^2	10^{-11} м^2
-5 Па	92	95	137	374
-10 Па	94	104	175	441

Для комплексной оценки функциональности систем вентиляции основания здания (SSD-систем) Jiranek и др. [134] использовали компьютерные программы Press3D, Wind2D и Radon2D, вычислявшие поля давления, температуры и скорости потока, и также поле концентрации радона в основании здания. Уравнение (2.46) записывалось в стационарной форме, генерация радона представлялась в виде

$$G = \frac{C_{Ra} \lambda \rho k_{эм}}{\varepsilon}. \quad (2.48)$$

Верификация программ производилась моделированием реального объекта с функционирующей SSD-системой. Грунт в основании здания моделировался в виде блока глубиной 3 м, выходящего в горизонтальном направлении на 1 м за периметр стен. Рассматривались два слоя грунта различной проницаемости, размеры плиты пола и основания принимались в соответствии с планом дома. Трубы в модели имели квадратное поперечное сечение, потери давления из-за трения в них учитывались путем введения их воздухопроницаемости $k = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$. В процессе моделирования варьировались параметры, способные оказать существенное влияние на результат, тогда как второстепенные параметры (пористость и эффективный коэффициент диффузии) и параметры, измеренные с достаточной точностью (проницаемость и разрежение в нижней части вертикальной трубы) принимались постоянными. Трещины шириной 0,5 мм по

всему периметру стыка стены с фундаментной плитой моделировали негерметичность оболочки здания.

Результаты расчетов показали, что концентрация радона в дренажном слое под домами с SSD-системами зависит от степени герметичности конструкции пола, находящейся в контакте с почвой. Из свойств грунта под зданием только проницаемость и скорость генерации радона оказывают существенное влияние на величину объемной активности. Расхождение измеренных и расчетных значений концентрации радона находилось в пределах 20...85%, хотя тенденции в распределении концентрации радона в окрестности заглубленной части здания моделируются в численной модели с достаточной надежностью.

Модель, разработанная в Национальной лаборатории Riso [160], совместно решает стационарное уравнение конвективного переноса и уравнение диффузионно-адвективного переноса радона в поровом пространстве, частично заполненном водой

$$\nabla v = 0 \text{ и } \nabla q = \varepsilon G - (\varepsilon_a + T\varepsilon_w)\lambda C_a. \quad (2.49)$$

При этом выражения для плотности потока почвенного газа q и плотности потока радона J имеют вид

$$v = -\frac{k}{\eta} \nabla P \text{ и } q = A_{ноч} v - D \nabla A_{ноч}, \quad (2.50)$$

где $A_{ноч}$ – объемная активность ^{222}Rn в поровом воздухе, Бк/м³;

D – объемный коэффициент диффузии радона, м²/с;

ε , ε_a и ε_w – полная пористость, пористости почвенного воздуха и воды, причем $\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_w$;

$T = C_w/C_a$ – коэффициент Оствальда, равный 0,30 при 15°C.

В модели предполагается изотермичность и изотропия проницаемости, а также отсутствие адсорбции радона на зернах грунта. Уравнения модели решаются численно с использованием метода конечных разностей. Верификация модели производилась сравнением расчетов с результатами лабораторного эксперимента, в ходе которого исследовалось поступление радона в тестовый цилиндр из нержавеющей стали объемом 40 л, помещенный в квадратную выемку

глубиной 0,52 м с длиной стороны (сверху) 2,4 м. Почвенный газ и радон поступали в цилиндр через отверстие диаметром 9,5 см в основании. Воздухонепроницаемая ПВХ-мембрана толщиной 0,6 мм закрывала цилиндр, а слой бентонита заполнял область раздела между почвой и мембраной, Под мембраной размещался слой высокопроницаемого гравия ($4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$) толщиной 15 см и длиной стороны 1,6 м. Исследования проводились при двух значениях депрессии цилиндра (8 и 13 Па), а также при отсутствии депрессии, кроме того оценивалась степень истощения (вымывания) радона в местах расположения зондов

$$\frac{A_{\text{диф},i} - A_{\text{адв},i}}{A_{\text{диф},i}}, \quad (2.51)$$

где $A_{\text{диф},i}$ – объемная активность радона в месте расположения зонда при отсутствии депрессии (диффузный перенос доминирует);

$A_{\text{адв},i}$ – объемная активность радона в зонде при депрессии цилиндра.

Данная модель удовлетворительно описывает комбинированный диффузионно-адвективный перенос радона, показывает хорошее согласие расчетного значения для вымывания с измеренным. Однако для скорости поступления почвенного газа была получена двукратная недооценка даже при наивысшей из измеренных воздухопроницаемостей.

Общим недостатком всех рассмотренных выше моделей является то, что они моделируют поступление радона под действием одного возмущающего давления, одним маршрутом и в одно помещение. Такой подход является существенно упрощенным, что и сказывается на точности результатов моделирования.

Одним из случаев, когда не могут быть применены описанные выше модели, является моделирование поступления радона в дома с подвалом под частью здания. Wang и др. при моделировании поступления радона в дома этого типа [161-163] использовали трехмерную модель FLUENT программного пакета CDF, позволяющего имитировать генерацию радона, его перенос в почве и поступление в здание через пол любой конструкции. Расчетная область

составляла четверть от фактической в предположении симметричности дома. Моделировался прямой (непосредственно из грунтового основания) и не прямой (через подвал) путь поступления радона в жилую зону, каждому из путей соответствовало свое возмущающее давление. Смесь почвенного газа и радона рассматривалась как жидкость, ее движение описывалось набором уравнений сохранения, включающих в себя уравнение непрерывности, уравнение энергии, уравнение импульса и уравнение переноса радона в виде

$$\nabla(A\bar{v} - D\nabla A) = \varepsilon(G - \lambda A), \quad (2.52)$$

где генерация радона

$$G = k_{эм} \rho C_{Ra} \lambda \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (2.53)$$

Принималось упрощающее предположение, что образование радона в транспортных средах пренебрежимо мало по сравнению с его содержанием в проходящей смеси, в результате чего уравнение переноса радона становилось независимым. На основе предложенной модели была проведена оценка влияния различных характеристик основания здания на уровни радона в помещениях, получено распределение концентрации радона в почве у основания здания. Корректность модели оценивалась сравнением численных результатов с аналитическим решением уравнения переноса.

В [162] с помощью близкой по структуре коммерческой программы BREEZE Wang и Ward моделировали радоновую обстановку в доме с подвалом при различных режимах вентиляции и ветровой нагрузки. Выходные параметры модели – средняя концентрация радона в жилой зоне и скорость его поступления в подвал – сравнивались с измеренными экспериментально в жилье Дербишира, отдельные процедуры программы калибровались по результатам натурных исследований. Исследование показало, что механическая вентиляция подвала, в отличие от естественной, является эффективным средством снижения уровней радона в жилой зоне. Кроме того, был экспериментально подтвержден предсказанный моделью эффект «обратной концентрации» радона – уровни радона в жилой зоне были выше, чем в подвале по причине прямого конвективно-

диффузионного поступления радона из грунтового основания. Подобный эффект также отмечен и в работе [164].

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов не дало надежного подтверждения адекватности модели, причиной чего авторы считают упрощенное представление источника радона в виде двух фиктивных воздушных объемов с регулируемой концентрацией радона в каждом из них.

Для определения объемной активности в каждом из помещений трехэтажного дома с подвалом Wang и др. в [161] использовали две вычислительные программы: на первом этапе мультizonальная модель HOUSE вычисляла возмущающие давления Δp_1 (поступление радона в подвал из грунта) и Δp_2 (прямое поступление радона в жилую зону). Эти давления являлись входными параметрами для модели GROUND, вычислявшей скорости поступления радона в подвал и в жилую зону, которые затем вводились в HOUSE в качестве внутренних источников радона для расчета его распределения по дому. Средняя погрешность для уровней радона составила порядка 15%, что качественно подтверждает адекватность модели.

Как видно из проведенного анализа, развитие численных методов решения дифференциальных уравнений привело к разработке целого ряда численных моделей поступления радона в здания, однако подобные модели, в лучшем случае, адекватны весьма ограниченной области условий поступления радона в здания.

2.4 Выводы

Проведенный анализ опыта математического моделирования поступления радона в здания позволяет сделать следующие выводы:

1. Развитие методов и средств решения уравнений переноса радона не привело к существенному прогрессу в вопросе описания формирования радоновой обстановки в здании. Причина подобной ситуации в том, что механизм поступления радона до конца не понят, а разработанные модели не являются универсальными.

2. Отмечено множество противоречий между результатами расчетов с использованием конвективных моделей поступления радона и экспериментальными фактами, тогда как расчеты, выполненные в предположении диффузионного поступления радона из грунтового основания здания и материалов ограждающих конструкций, достаточно хорошо согласуются с результатами натурных исследований. Таким образом, при разработке модели формирования радоновой обстановки в здании целесообразно использовать гипотезу о доминировании диффузионного механизма поступления радона.

3. Сложность и многофакторность процесса формирования радоновой обстановки в здании указывает на проблематичность разработки универсальной математической модели, способной адекватно описать множество состояний системы «грунт-атмосфера-здание». В таких условиях более перспективна разработка модели, имеющей ограниченную область применения, но корректно описывающей процесс накопления радона в заданных условиях.

4. Адекватность модели зависит от точности значений входных параметров, которые могут быть определены в рамках лабораторного эксперимента, позволяющего управлять исследуемым параметром при фиксированных значениях остальных величин. Получение подобной информации в рамках натурального эксперимента, характеризующегося одновременным изменением большого числа параметров, практически невозможно.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Анализ состояния проблемы облучения населения радоном в помещениях в целом, и моделирования радоновой обстановки в здании в частности, показал необходимость экспериментального исследования следующих вопросов:

1. Оценки значимости проблемы облучения населения радоном на территориях, не относящихся к потенциально радоноопасным.
2. Установить основных закономерностей переноса радона в пористой среде, значимости и направления действия факторов, существенно влияющих на формирование радоновой обстановки в здании.

В данной главе представлены результаты решения поставленных задач.

3.1 Оценка радоновой обстановки в зданиях равнинных территорий на примере города Луганска

К потенциально нерадоноопасным территориям относятся области вне зон текущей активной геодинамики, для которых не характерно присутствие в геологическом разрезе необводненных пород-коллекторов радона или пород с высокими концентрациями ^{226}Ra . Таковыми, в первую очередь, являются равнинные территории, для которых характерно преобладание горизонтальной расслоенности геологической среды над вертикальной, в результате чего затруднен перенос газов в вертикальном направлении. Поскольку глубина поступления радона в здания и сооружения даже для наиболее проницаемых грунтов не превышает 15 м [42-43], то для равнинных платформенных территорий радоновая нагрузка на подземные ограждающие конструкции здания определяется литологическим составом и содержанием радия в приповерхностных грунтах.

К числу равнинных территорий РФ, приуроченных к плитам молодых платформ, не имеющих выходов фундамента на поверхность, относятся Средне-Русская, Смоленско-Московская и Приволжская возвышенности, Северные Увалы и Тиманский кряж на Русской плите, Средне-Сибирское плоскогорье – на

Ленно-Енисейской, Печорская низменность – на Печорской, равнина Предкавказья – на Скифской, Западно-Сибирской равнина – на Западно-Сибирской плите [40]. Равнинные области занимают около 75% территории Российской Федерации.

Территория Луганска и области также относится к равнинным территориям, она представляет денудационно-аккумулятивную равнину на слабодислоцированной мезокайнозойской основе на территории регионального разлома девонского возраста. Область расположена между Украинским и Воронежским кристаллическими щитами, на метаморфизованных и изверженных породах докембрийского фундамента залегают девонские, карбонские, пермские, триасовые, юрские, меловые, третичные и четвертичные осадки. Каменноугольные отложения представлены снизу известняками мощностью около 500 м, потом идут переслаивающиеся толщи песчаника, алевролита, аргиллита.

В тектонической структуре Луганской области отмечена локальная складчатая структура – Северо-Донецкий надвиг, протягивающийся с северо-западного направления к юго-восточному, два разлома которого пересекают Луганск на глубине порядка 1 км. Разломы погребены чехлом более поздних отложений каменноугольного возраста, представленных переслаивающимися терригенными песчаниками, песчаными и глинистыми сланцами, известняками и углями, мощность которых составляет от двадцати до ста тридцати метров. Почти повсеместно выше них идут отложения верхнемелового периода: мел, серо-зелёная глина, запесоченный мергель. Ввиду большой мощности осадочных пород чехла складчатые структуры не оказывают влияния на перенос вещества к дневной поверхности.

Таким образом, по геологической структуре территория Луганска и Луганской области не может быть отнесена к радоноопасным. С целью оценки радоновой ситуации в помещениях зданий на потенциально нерадоноопасной территории в 2014-2016 г. в Луганске проводились измерения уровней радона в эксплуатируемых зданиях различных типов. На момент начала исследований

территория Луганска и области была недостаточно изучена в контексте облучения населения радоном по следующим причинам:

- в Украине традиционно радоноопасными считаются только области, расположенные в пределах Украинского кристаллического щита;
- радиационный контроль облучения населения в Украине большей частью проводился в областях, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС (Киевской, Сумской, Винницкой, Житомирской, Ровенской);
- крайне низкий уровень жилищного и промышленного строительства, обусловленный перманентным экономическим кризисом в промышленных районах Украины, привел к тому, что инженерно-экологические изыскания носили единичный характер.

Радиологический мониторинг городской застройки Луганска включал три основных этапа [167]:

- оценка относительной радоноопасности районов города (районирование территории выполнялось по административному принципу) по результатам мгновенных измерений ЭРОА радона в воздухе помещений и мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения естественных радионуклидов (ЕРН) в материалах ограждающих конструкций;
- выбор экспериментальных объектов на территории наиболее радоноопасного района города, проведение в них длительных исследований с целью определения среднегодовой ЭРОА и изучения сезонных вариаций уровней радона;
- заключение на основании проведенных исследований об актуальности радоновой проблемы для зданий на равнинных территориях.

Измерения уровней радона в воздухе помещений производились радиометром ДПР радона «АТЛЕШ-1м» (рисунок 3.1), предназначенным для экспрессных, квазиинтегральных и интегральных измерений ЭРОА радона аспирационным методом. В радиометре также был реализован режим циклических измерений ЭРОА радона, позволяющий производить их с наперед заданной периодичностью без участия оператора.

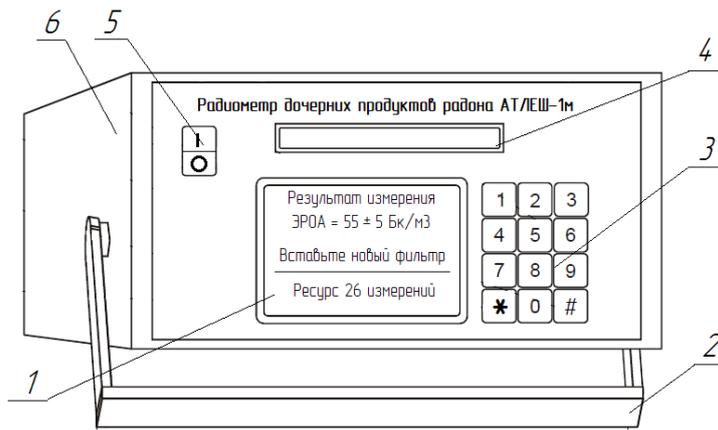


Рисунок 3.1 – Радиометр дочерних продуктов распада радона «АТЛЕШ-1м»: 1 – жидкокристаллический экран; 2 – ручка для переноса прибора и его установки в рабочее положение; 3 – панель управления; 4 – держатель кассеты с фильтром; 5 – кнопка включения/выключения; 6 – корпус прибора

Все измерения проводились в «закрытых» помещениях, то есть не открывавшихся минимум 24 часа до начала замеров. В этих же помещениях производилось измерение МЭД гамма-излучения строительных материалов.

В структуре Луганска находится четыре района: Жовтневый (около 42% населения), Артемовский (33%), Ленинский (17%), Каменнобродский (8%). В наибольшем по площади Каменнобродском районе более 90% зданий – это частное жилье со средним возрастом свыше 50 лет; в основе жилищного фонда центрального Ленинского района 5- и 9-этажные кирпичные здания 60-х годов постройки; в Жовтневом районе преобладают 5-этажные кирпичные и 9-этажные панельные жилые дома 1965 – 1985 годов постройки; наиболее новым является Артемовский район, большая часть населения которого проживает в 12 – 16-этажных домах, построенных с конца 80-х по середину 90-х годов. Результаты исследования уровней радона в районах города представлены в таблице 3.1 (соотношение частного жилья и многоэтажных зданий выбиралось пропорционально их количеству в структуре жилищного фонда данного района). В результате первого этапа исследования была установлена повышенная радоноопасность зданий на территории Каменнобродского района города Луганска.

Таблица 3.1 – Результаты измерений уровней радона в зданиях Луганска

Район города	Тип зданий	Число измерений	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	МЭД, мкЗв/час
<i>Артемовский</i>	частное жилье	50	13,7 ± 2,4	0,113
	многоэтаж.	20	68,9 ± 39,1	0,118
<i>Каменнобродский</i>	частное жилье	192	240,4 ± 23,0	0,121
	многоэтаж.	15	44,0 ± 7,0	0,115
<i>Ленинский</i>	частное жилье	78	33,6 ± 5,0	0,107
	многоэтаж.	92	40,9 ± 5,6	0,117
<i>Жовтневый</i>	частное жилье	192	69,6 ± 3,7	0,115
	многоэтаж.	94	24,8 ± 2,3	0,119

Второй этап состоял в определении объектов исследования и проведении в них длительных измерений. В качестве объектов исследования были выбраны:

- все дошкольные образовательные учреждения (ДОУ) Каменнобродского района, построенные по типовому проекту;
- частный жилой дом в Каменнобродском районе, архитектура которого типична для жилищного фонда района;
- учебные корпуса Луганского национального университета имени Тараса Шевченко, расположенного в Ленинском районе.

Измерения ЭРОА радона и МЭД γ -излучения проводились в четырех ДОУ Каменнобродского района Луганска [171; 172]:

- в коммунальном дошкольном учебном учреждении «Ясли-садик № 57», ул. Рудя, 91;
- коммунальном дошкольном учебном учреждении «Детский сад № 10», ул. Рудя, 73, а;
- ДОУ «Ясли-садик комбинированного типа № 55», ул. 21-го Мюда, 54;
- коммунальном ДУУ «Ясли-садик № 97», ул. Артема, 100.

Объекты исследования, выполненные по типовому проекту, имели сходную архитектуру: двухэтажные кирпичные здания возрастом более сорока лет без монолитного фундамента. Мгновенные измерения уровней радона производились

во всех помещениях ДОУ, кроме того раз в месяц в группах выполнялись непрерывные измерения на протяжении не менее 48 часов с интервалом в один час в закрытых помещениях. Результаты измерений ЭРОА радона в одном из ДОУ представлены на рисунке 3.2.

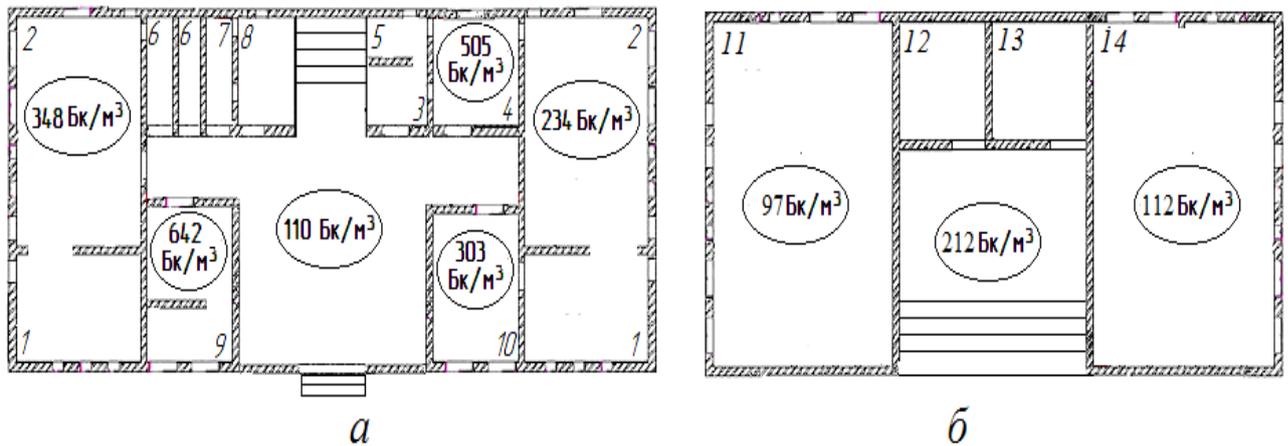


Рисунок 3.2 – Результаты измерения среднегодовой ЭРОА в яслях-садике № 57: а – первый этаж; б – второй этаж; 1 – спальня; 2 – игровая; 3 – кухня; 4 – столовая; 5 – моечная; 6 – туалетная с умывальной; 7 – санузел для персонала; 8 – кладовая; 9 – кабинет заведующей; 10 – кабинет логопеда; 11 – методический кабинет; 12 – бухгалтерия; 13 – хозяйственное помещение; 14 – музыкальный зал [171]

Проведенные исследования показали высокие уровни радона в трех из четырех ДОУ (таблица 3.2), при оценке индивидуальной годовой дозы облучения время пребывания детей в помещении принималось 2000 ч/год и еще 400 ч/год – пребывание на территории ДОУ. При переходе от экспозиции к дозе облучения радоном использовался конверсионный множитель $11,9 \text{ нЗв}/(\text{Бк}\cdot\text{ч}/\text{м}^3)$, приведенный в стандарте «Защита населения от природных источников излучения в зданиях» (DS421) [45].

В лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИ строительной физики Российской Академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) Минстроя России был выполнен гамма-спектрометрический анализ грунта (мергелевая глина), отобранного на глубине закладки фундамента на территории ДОУ с наибольшим средним ЭРОА радона в помещениях («Ясли-

садик комбинированного типа № 55»). Протокол измерений представлен в *Приложении 1*, удельная активность радия в грунте составила

$$A_{Ra} = 35,0 \pm 6,8 \text{ Бк/кг},$$

а удельная эффективная активность естественных радионуклидов в грунте, определяемая по формуле

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K,$$

составила

$$A_{эфф} = 104,5 \pm 22,9 \text{ Бк/кг}.$$

Полученный результат позволяет отнести данный грунт к почвам со средним содержанием ЕРН (среднемировое содержания радия в почвах составляет 29,7 Бк/кг). Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что существенное превышение контрольного уровня ЭРОА радона может иметь место в зданиях, построенных на грунтах со средним содержанием радия.

Таблица 3.2 – Результаты радиационного мониторинга ДОУ

ДОУ, адрес	ЭРОА, Бк/м ³	МЭД _{пом} , мкЗв/ч	МЭД _{ул} , мкЗв/ч	Годовая доза, мЗв
ДОУ «Ясли-садик № 57», ул. Рудя, 91	220,7	0,115	0,125	5,53
ДОУ «Детский сад № 10», ул. Рудя, 73, а	165,7	0,105	0,125	4,20
ДОУ «Ясли-садик комбинированного типа № 55», ул. 21-го Мюда, 54	244,5	0,110	0,125	6,09
ДУУ «Ясли-садик № 97», ул. Артема, 100	27,0	0,115	0,125	0,92

Оценка уровней радона в многоэтажных зданиях производилась в Луганском национальном университете имени Тараса Шевченко [168]. В период с декабря по февраль было обследовано 175 учебных и служебных помещениях экспрессным методом с целью выявления помещений с наиболее высокими уровнями радона. Достаточно высокие значения ЭРОА на верхних этажах

свидетельствуют о переносе радона конвективными потоками воздуха в здании (рисунок 3.3).

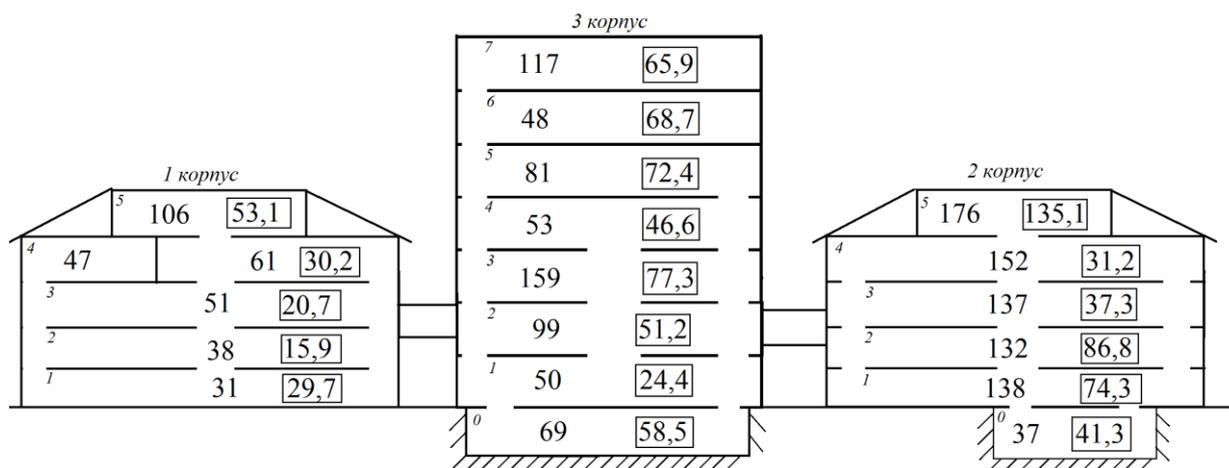


Рисунок 3.3 – Распределения уровней радона по высоте зданий: ЭРОА радона в коридорах и аудиториях университета (в прямоугольнике) [168]

Наибольшие уровни радона были выявлены в учебной лаборатории 0-06 «Сопротивление материалов и детали машин», расположенной на цокольном этаже учебного корпуса № 3, имеющего монолитный фундамент в виде бетонной плиты толщиной 350 мм. В лаборатории было выполнено еще 680 измерений ЭРОА радона при одновременной фиксации разности температур внутри и снаружи помещения. Исследования представляли четыре двухнедельных цикла непрерывных измерений на протяжении года при стационарном режиме эксплуатации лаборатории.

Регистрируемая картина для всех циклов измерений имела сходный вид: ярко выраженный максимум (чаще всего один за сутки) и чередование выступов и провалов меньшей амплитуды (рисунок 3.4, а). Максимумы ЭРОА регистрировались в произвольное время суток, усреднение результатов измерений по сезонам приводит к сглаживанию кривых (рисунок 3.4, б), указывая на отсутствие цикличности в поступлении радона в здания. Средние уровни радона для помещений цокольного этажа составили $71,3 \pm 4,6$ и $125,5 \pm 7,9$ Бк/м³ для теплого и холодного сезонов соответственно. Поскольку температура в экспериментальной лаборатории на протяжении всего периода измерений

менялась несущественно ($\pm 1,5^\circ\text{C}$), при статистической обработке данных вместо температурного напора ΔT использовалась температура наружного воздуха T .

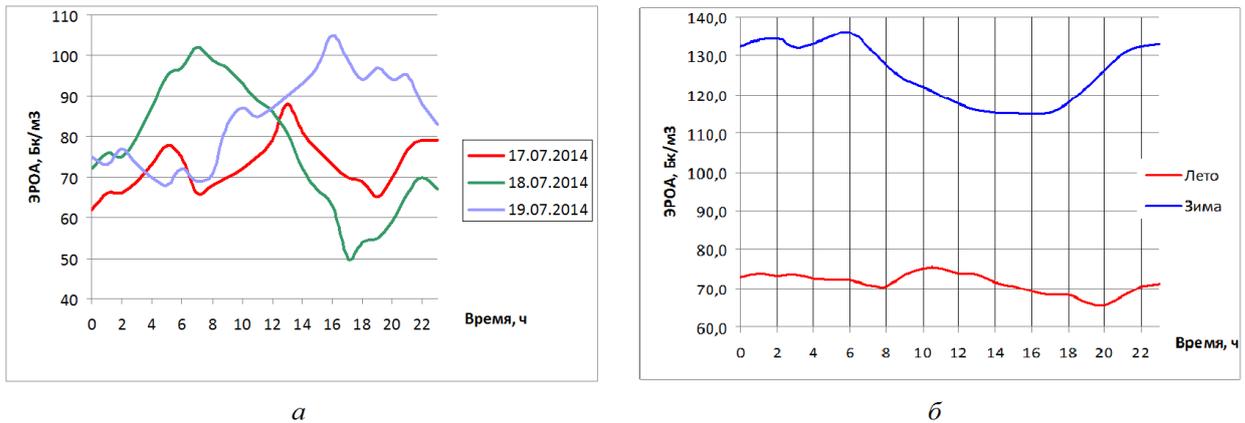


Рисунок 3.4 – Вариации уровней радона в помещениях: а – суточные; б – сезонные

Коэффициент парной корреляции между ЭРОА радона и температурой воздуха снаружи здания по всему циклу измерений составил [169]

$$r_{\text{ЭРОА-}T} = -0,875.$$

Однако аналогичные коэффициенты, рассчитанные отдельно по каждому из четырех циклов измерений были существенно ниже ($r_{\text{ЭРОА-}T} = -0,15 \dots -0,25$), что, на наш взгляд, указывать не на преобладание конвекционного механизма, а на изменения условий переноса радона из почвенного массива к подземным ограждающим конструкциям здания. Так, увеличение влажности грунта вокруг здания и его промерзание могут привести к уменьшению коэффициента диффузии радона в поровом пространстве, увеличив тем самым радоновую нагрузку на основание.

Гамма-спектрометрический анализ глинистого грунта, отобранного в основании 3-го корпуса университета также был выполнен в лаборатории радиационной безопасности НИИСФ РААСН и также показал среднее содержание радия

$$A_{Ra} = 37,5 \pm 6,7 \text{ Бк/кг}$$

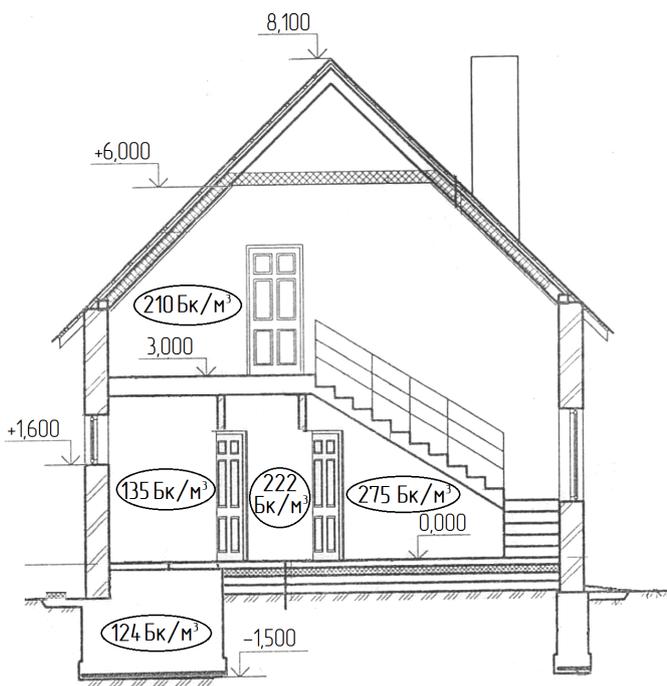
при удельной эффективной активности ЕРН в грунте

$$A_{\text{эфф}} = 112,0 \pm 22,5 \text{ Бк/кг.}$$

Проведенные исследования показали, что уровни радона в помещениях университета не превышают установленные контрольные уровни, однако в

зимнее время близки к ним, что указывает на обоснованность проведения простейших защитных мероприятий (обеспечение кратности воздухообмена не менее $0,5 \text{ ч}^{-1}$).

Последний объект исследования представлял собой частный дом 2014 г. постройки в Каменнородском районе, имеющий два этажа и фундамент в виде бетонной отмостки на щебеночном основании с подвалом под частью дома (рисунок 3.5) [171]. Известные конструктивные характеристики объекта



позволяют в дальнейшем использовать его для апробации математической модели поступления радона в помещения. К тому же, данная конструкция представляет достаточный интерес для моделирования поступления радона, поскольку радон может поступать в жилую зону не только из подвала, но и напрямую посредством диффузии через горизонтальные подземные ограждающие конструкции.

Рисунок 3.5 – Результаты измерения среднегодовой ЭРОА радона в частном жилье Каменнородского района [170]

Объект исследования не отапливался и не эксплуатировался жильцами, измерения ЭРОА радона в нем производились на протяжении всего 2016 г., в среднем – две недели на протяжении каждого месяца в циклическом режиме с интервалом в 2 часа. С помощью метеостанции измерялась разница температур внутри и снаружи здания (помещения не оборудованы системой отопления). Результаты измерений среднегодовой ЭРОА по жилым помещениям представлены на рисунке 3.5, при этом суточное изменение активности радона в воздухе помещений носило сложный аperiodический характер, мало

согласующийся с изменением разности температур воздуха снаружи и внутри помещения.

Измерения удельной активности радия в мергелевой глине, отобранной на глубине закладки фундамента экспериментального объекта, показали еще более низкое значение

$$A_{Ra} = 23,9 \pm 5,5 \text{ Бк/кг}$$

при удельной эффективной активности ЕРН

$$A_{эфф} = 71,3 \pm 17,7 \text{ Бк/кг.}$$

Исследования в данном объекте также показали превышение установленного контрольного уровня (200 Бк/м³) для среднегодовой ЭРОА. Повышенная радоноопасность зданий в Каменнобродском районе, на наш взгляд, обусловлена двумя причинами: достаточно высокой воздухопроницаемостью формирующих подстилающую поверхность мергелевых глин и недостаточным сопротивлением радонопроницанию подземных ограждающих конструкций экспериментальных объектов.

3.2 Экспериментальное исследование процесса переноса радона через пористую среду (с внутренними распределенными источниками радона)

3.2.1 Задачи экспериментального исследования

Как было показано в главе 2, до сих пор не существует единого мнения относительно доминирующего механизма переноса радона в пористой среде. Расхождение предсказаний моделей с экспериментальными данными характерно для диффузионных, конвективных и конвективно-диффузионных моделей. На наш взгляд, можно выделить две основных причины данной проблемы:

- ограниченность области применения любой математической модели в силу использованных в ней упрощающих допущений.
- использование в качестве входных параметров моделей результатов натуральных исследований, в том числе – и других авторов.

Первый пункт может указывать на принципиальную невозможность построения универсальной модели формирования радоновой обстановки, не

только по причине недостаточных текущих знаний по данной проблеме, но и в силу бесконечного множества состояний системы «грунт-атмосфера-здание», вызванного многообразием конструктивных особенностей зданий и характеристик окружающей среды. В такой ситуации более перспективной является разработка модели, адекватно описывающей поступление радона в здания определенного типа.

Многофакторный характер процесса формирования радоновой обстановки в зданиях и отсутствие возможности инструментального контроля отдельных факторов в рамках натурального исследования приводят к тому, что важная информация об особенностях процесса может не только остаться скрытой в массе результатов эксперимента, но и быть неверно интерпретирована. Поскольку использование результатов натуральных исследований в качестве входных параметров модели может являться дополнительным источником ошибок, целесообразно получение подобных данных в рамках лабораторного эксперимента, где имеется возможность управлять одним из параметров, потенциально влияющих на формирование радоновой обстановки в здании, при фиксированных значениях других параметров.

В результате выполненных ранее исследований, описанных в предыдущей главе, было установлено:

- диффузионный перенос радона в здания через подземные ограждающие конструкции, вызванный разностью концентраций радона у основания здания и в воздухе помещений нижнего этажа, является постоянно действующим и слабо изменяющимся во времени.

- разность давлений на наружной и внутренней границах подземной ограждающей конструкции здания составляет 2-5 Па и может являться причиной конвективного поступления радона в здания.

- разность температур в помещении и в основании здания в реальных условиях не превышает 20°C и может являться причиной термодиффузионного поступления радона в здания.

В соответствии с этим определены следующие стадии лабораторного эксперимента:

1. Сборка физической модели пористой среды, регистрация установившегося диффузионного потока радона с поверхности пористой среды ($\Delta P = \Delta T = 0$).

2. Реализация условий для развития бародиффузионного переноса радона путем создания разности давлений $\Delta P = 5-50$ Па, регистрация величины конвективно-диффузионного потока.

3. Реализация условий для термодиффузионного переноса радона путем создания разности температур $\Delta T = 5-50$ °С, регистрация величины совместного потока молекулярной и термической диффузии.

4. Обоснование целесообразности (нецелесообразности) использования «эквивалентного» коэффициента $D_{э\kappa\text{в}}$ вместо бинарного коэффициента диффузии радона в воздухе D

$$D_{э\kappa\text{в}} = k(\Delta P) \cdot k(\Delta T) \cdot D, \quad (3.1)$$

где $k(\Delta P)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние бародиффузии на процесс переноса радона;

$k(\Delta T)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние термодиффузии на процесс переноса радона.

Кроме того, в рамках экспериментального исследования возможно определение отдельных физических характеристик самой пористой среды. Так, при движении почвенного газа через пористую среду сила внешнего трения пропорциональна первой степени скорости, то есть справедлив линейный закон фильтрации (закон Дарси)

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{k\Delta P}{\eta L}, \quad (3.2)$$

где Q – объемный расход газа, м³/с;

S – площадь поверхности пористой среды, м²;

k – коэффициент воздухопроницаемости материала, м²;

L – высота столба материала, м;

η – динамическая вязкость воздуха (*Приложение 2*), Па·с;

ΔP – перепад давлений, Па.

Соотношение (3.2) позволяет определять воздухопроницаемость материала по измеряемым в процессе эксперимента величинам расхода воздуха Q , перепада давлений ΔP и температуры подаваемого воздуха T .

3.2.2 Описание физической модели и технических характеристик экспериментальной установки

Физическая модель пористой среды, в которой осуществляется перенос радона, представляет цилиндрическую колонку концентрата циркониевого зернистого высотой 1500 мм, заключенную в трубу *II* из непластифицированного ПВХ (ТУ У 25.2-30361225-003:2005) с внутренним диаметром 160 мм и толщиной стенок 4 мм (рисунок 3.6). Длина трубы выбрана с расчетом, чтобы она была близкой по величине к длине диффузии радона в большинстве грунтов (*Приложение 3*).

Торцы трубы герметизировались крышкой *I* и заглушкой *III* с целью устранения влияния изменения температуры воздуха в лаборатории на процесс переноса радона. Теплоизоляция установки достигалась использованием ППУ-теплоизоляции типа «скорлупа» с внутренним диаметром 160 мм и толщиной 50 мм по всей длине трубы.

Концентрат циркониевый зернистый (КЦЗ) в данной физической модели выполняет следующие функции:

- формирует пористую среду с известными физическими характеристиками, в которой происходит перенос радона;
- является мощным источником радона в силу высокого содержания в нем естественных радионуклидов.

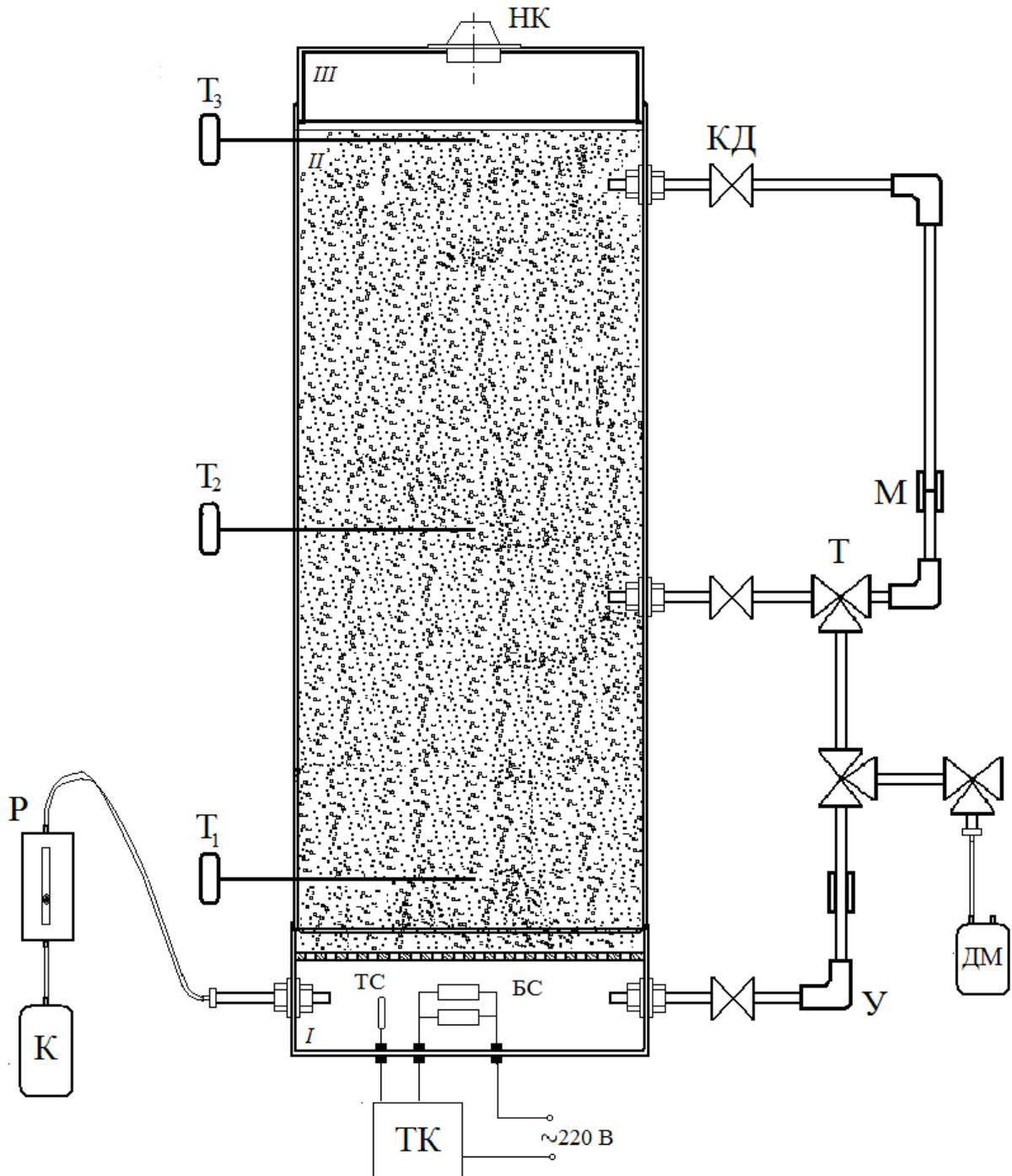


Рисунок 3.6 – Схема экспериментальной установки: НК – накопительная камера; T_1 , T_2 и T_3 – погружные термометры; P – ротаметр поплавковый; К – компрессор; ТК – термоконтроллер TC4S; ТС – термосопротивление; БС – блок сопротивлений; КД – кран шаровый (двухходовой, «бабочка») В-В 1/2"; Т – трехходовой шаровый кран В-В-В 1/2"; У – переходник угловой 90° 1/2"; М – муфта латунная; ДМ – дифференциальный манометр

Измерение удельной активности радия-226 в КЦЗ выполнялись в лаборатории радиационной безопасности НИИСФ РААСН Минстроя России на

стационарной гамма-спектрометрической установке СГС-200М (программное обеспечение «Прогресс») с заявленной погрешностью не более 30%. Измерения проводились для трех проб с 08.07.2017 по 19.06.2017 г., кривые накопления представлены на рисунке 3.7.

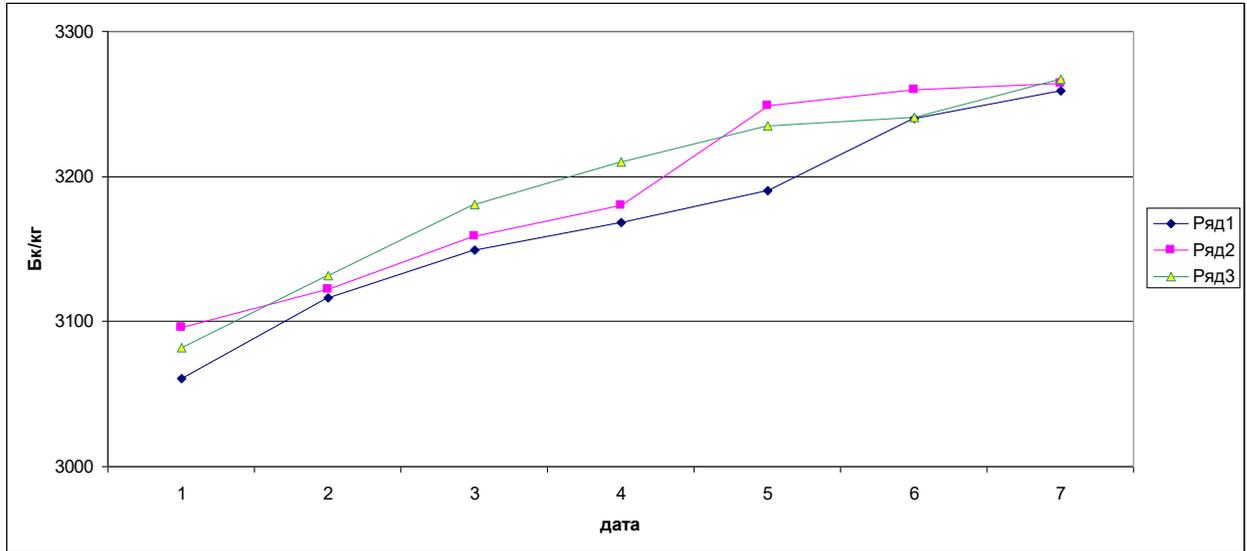


Рисунок 3.7 – К определению удельной активности радия и коэффициента эманирования концентрата циркониевого зернистого

По результатам измерений среднее значение удельной активности радия в используемом КЦЗ составило

$$C_{Ra} = 3263 \pm 339 \text{ Бк/кг},$$

при этом удельная эффективная активность ЕРН составила

$$A_{эфф} = 4536,2 \pm 366,6 \text{ Бк/кг}.$$

Столь высокая активность КЦЗ, с одной стороны, позволяет получать высокие значения ППР с поверхности материала, существенно повышая чувствительность исследований. С другой стороны, по величине удельной эффективной активности КЦЗ не может быть отнесен к радиоактивным материалам, требующим специального контроля за их перемещением, а также особых условий обращения с ними.

Коэффициент эманирования радона для КЦЗ определялся на этих же пробах гамма-методом. Его суть состоит в измерении дополнительной активности,

возникающей за счет радона и его ДПП при герметизации пробы, и вычислении коэффициента эманирования по формуле

$$k_{эм} = \frac{C_{Ra,2} - C_{Ra,1}}{C_{Ra,2}}, \quad (3.3)$$

где $C_{Ra,2}$ – удельная активность радия, измеренная для загерметизированной пробы КЦЗ через время, достаточное для установления радиоактивного равновесия в измерительной емкости, Бк/кг;

$C_{Ra,1}$ – удельная активность радия, измеренная в азрированной пробе КЦЗ, Бк/кг.

По результатам измерений коэффициент эманирования радона в используемом КЦЗ составил

$$k_{эм} = 0,022 \pm 0,004.$$

Столь низкий коэффициент эманирования радона можно объяснить малой площадью поверхности зерен КЦЗ.

В процессе сборки экспериментальной установки был определен ряд физических характеристик КЦЗ нерадиационной природы. Насыпная плотность материала составила

$$\rho_n = 2\,900 \text{ кг/м}^3.$$

Влажность КЦЗ определялась непосредственно перед засыпкой в экспериментальную установку весовым методом на основе ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» и составила

$$w = 0,1\%.$$

Общая пористость КЦЗ была найдена по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{(1+w) \cdot \rho_з} = 0,38, \quad (3.4)$$

где $\rho_з = 4\,650 \text{ кг/м}^3$ – плотность зерен КЦЗ, указанная в технической документации, предоставленной поставщиком материала.

Эффективная пористость КЦЗ, представляющая собой объемную долю связанных между собой пор, через которые возможна фильтрация радона, определялась по формуле

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon \cdot (1 - w + K_T w) = 0,38, \quad (3.5)$$

где K_T – коэффициент растворимости, равный 0,23 при температуре 25°C (температура КЦЗ на момент сборки установки).

Проведенные исследования позволяют определить мощность P источника радона в экспериментальной установке

$$P = \lambda V C_{Ra} \rho k_{эм} = 0,131 \text{ Бк/с} = 13,1 \text{ мБк/с}, \quad (3.6)$$

где $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – постоянная распада радона;

$V = 0,03 \text{ м}^3$ – объем КЦЗ в экспериментальной установке.

Заглушка *III* в верхней части установки (рис. 3.6) выполняет функции герметизации внутреннего объема трубы и измерения плотности потока радона, выделяющегося с поверхности КЦЗ. В отверстии диаметром 70 мм, высверленном в заглушке, герметично монтировалась накопительная камера НК-32 с сорбционной колонкой СК-13, заполненной активированным углем марки СКТ-3С ТУ № 6-16-1158-67 (рисунок 3.8).

Накопительная камера предназначена для измерения ОА радона в верхнем воздушном зазоре (или ППР с поверхности КЦЗ) при различных условиях переноса радона. Определение потока радона с поверхности модели пористой среды производится согласно «Методике измерений объемной активности радона в воздухе жилых и служебных помещений, а также в рудниках всех типов, путем отбора пробы воздуха» методом пассивной сорбции. Сорбционная колонка СК-13, заполненная регенерированным активированным углем, устанавливается в накопительную камеру НК-32 на 4 часа. По окончании экспонирования адсорбер пересыпается в блок детектирования бета-радиометра РГБ 20П2 измерительного комплекса «Камера» для определения активности угля или ППР радона. Пересчет данных величин в объемную активность радона в воздухе автоматически выполняется измерительным комплексом.

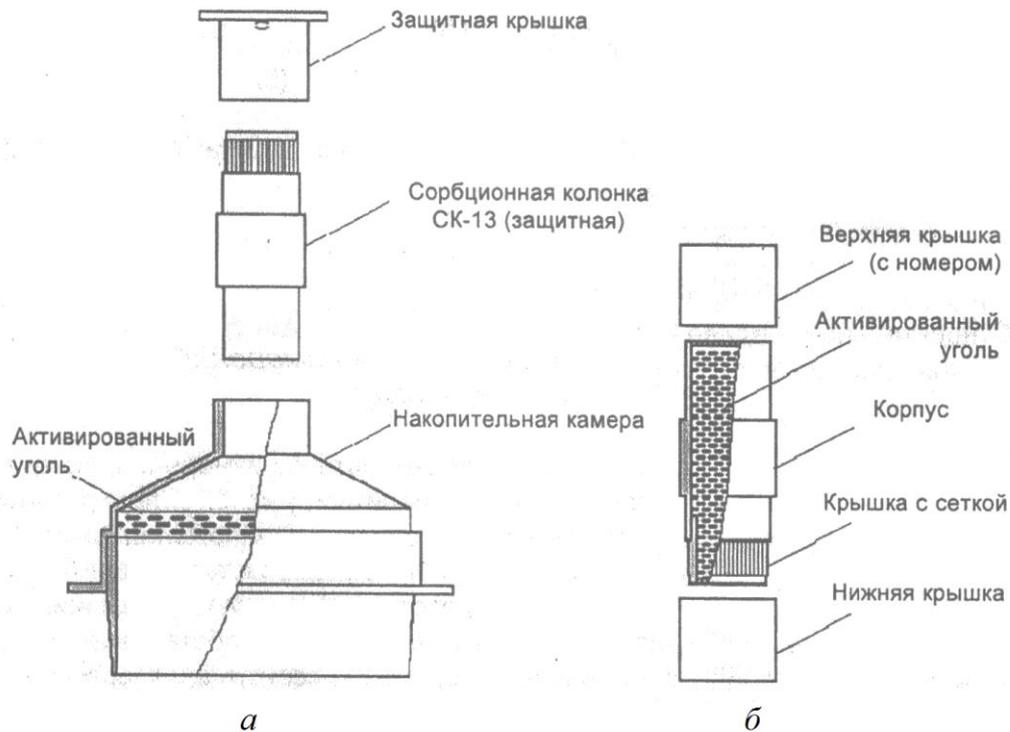


Рисунок 3.8 – Средства измерения активности радона: *a* – накопительная камера НК-32; *б* – сорбционная колонка СК-13

В нижней камере *I* экспериментальной установки размещены вводы пневматической и электрической систем. Перепад температур по столбу пористой среды создается двумя соединенными параллельно керамическими сопротивлениями $R_1 = R_2 = 13$ кОм. Рассеиваемой мощности

$$W = \frac{U^2}{R_{\Sigma}} = \frac{220^2}{6500} = 7,45 \text{ Вт}$$

достаточно для создания требуемого перепада температур более 50°C .

Керамические сопротивления включаются в бытовую электрическую сеть через температурный контроллер TC4S, осуществляющий управление нагревательными элементами с целью поддержания в объеме под пористой средой установленной температуры. Отклонение от заданной температуры не превышает $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, чувствительным элементом температурного контроллера является термосопротивление марки Pt-1000, размещенное в верхней части камеры *I* (рисунок 3.9) и закрепленное на крышке. Измерение поля температур по

оси установки осуществляется тремя погружными термометрами T_1 - T_3 , обеспечивающими получение результатов с погрешностью не более $0,1^\circ\text{C}$.

Алюминиевая крышка диаметром 160 мм и толщиной 5 мм устанавливалась на специальной подставке из ПВХ и выполняла несущую функцию, поддерживая колонку КЦЗ. Для того, чтобы крышка не оказывала сопротивления прохождению воздушного потока, в ней было высверлено 68 отверстий диаметром 10 мм (рисунок 3.9).

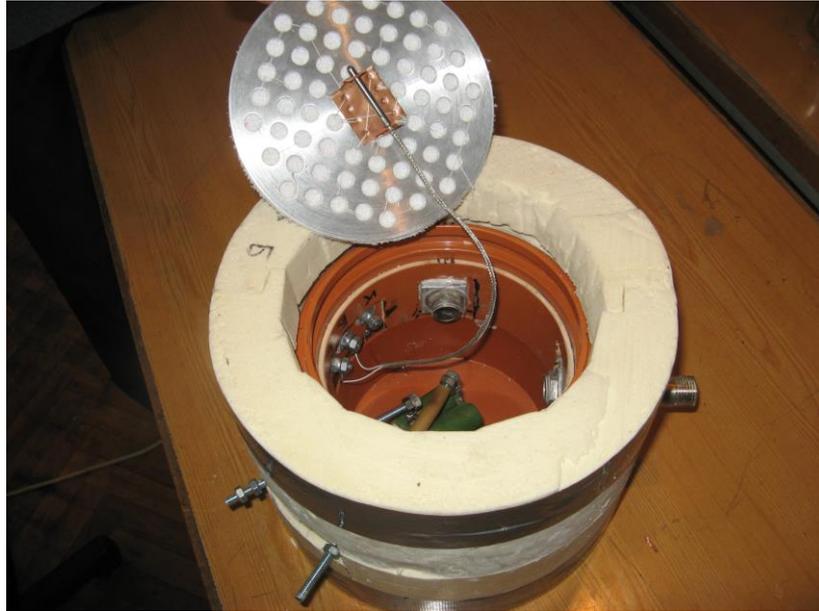


Рисунок 3.9 – Нижняя камера I экспериментальной установки в сборе

Также в нижней части камеры I расположен ввод пневматической системы, предназначенной для создания перепада давлений по столбу КЦЗ при исследовании вклада бародиффузионного переноса. Пневматическая система включает в себя маломощный компрессор (2 Вт) постоянного действия, подающий поток воздуха через поплавковый ротаметр Ну-Lок, предназначенный для измерения потоков воздуха в диапазоне от 100 до 1000 $\text{см}^3/\text{мин}$. При помощи ротаметра также осуществляется регулировка потока, поступающего в нижнюю камеру. Кран на входе в камеру предназначен для герметизации ее объема после создания требуемого избыточного давления.

Для измерения величины избыточного давления в экспериментальной установке реализованы три ввода, расположенные на расстоянии 0,7 м друг от

друга. Посредством латунных труб диаметром 1/2'' вводы объединялись в пневматическую систему, подключенную к дифференциальному манометру высокой чувствительности Testo, позволяющему измерять разность давлений с точностью до 0,1 Па. Каждый из вводов комплектовался шаровым краном 1/2'' В-В типа «бабочка», позволяющим герметизировать внутренний объем трубы при измерениях на других участках. Соединение вводов между собой реализовано трехходовыми шаровыми кранами 1/2'' В-В-В. Для удобства сборки пневматической системы в верхней и нижней частях выполнены сгоны латунных труб при помощи муфты. Общий вид экспериментальной установки в сборе показан на рисунке 3.10.

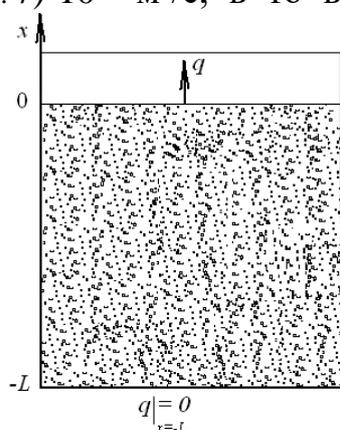


Рисунок 3.10 – Общий вид экспериментальной установки в сборе

3.2.3 Обоснование адекватности физической модели реальным условиям переноса радона

Физическая модель, представленная на рисунке 3.10, является упрощенным представлением реальной пористой среды, в которой осуществляется перенос радона. Проверка соответствия условий переноса радона в модели реальным условиям переноса радона в пористой среде необходима и может быть выполнена сопоставлением расчетных значений активности радона в верхнем объеме воздуха с измеренными в рамках натурального эксперимента.

Сухие пески имеют достаточно высокий коэффициент диффузии радона $(1 \div 7) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, в то время как коэффициент диффузии радона в ПВХ имеет



порядок $10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$. Различие коэффициентов диффузии в несколько порядков позволяет пренебречь горизонтальным переносом радона в физической модели и рассматривать задачу одномерного переноса радона в пористой среде. Расчетная схема для данной физической модели представлена на рисунке 3.11.

Рисунок 3.11 – Расчетная схема

Уравнение одномерного стационарного переноса радона в пористой среде имеет вид

$$D \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \lambda C_{Ra} \rho k_{эм} - \lambda \varepsilon A = 0, \quad (3.7)$$

где D – коэффициент диффузии радона в концентрате циркониевом зернистом, $\text{м}^2/\text{с}$;

A – объемная активность радона, $\text{Бк}/\text{м}^3$;

λ – постоянная распада радона, с^{-1} ;

ρ – плотность КЦЗ, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ε – пористость КЦЗ.

Второе слагаемое в (3.7) описывает генерацию радона в массиве КЦЗ, а третье – его «сток» вследствие радиоактивного распада. Граничные условия для представленной расчетной схемы имеют вид:

- плотность потока радона на нижней границе пористой среды равна нулю

$$q|_{x=h} = 0;$$

- объемная активность воздуха равна нулю

$$A(0) = 0.$$

Аналитическое решение задачи одномерного диффузионного переноса радона в пористой среде относительно ППР имеет вид

$$q|_{x=0} = \sqrt{\frac{\lambda D}{\varepsilon}} \cdot C_{Ra} \rho k_{эм} \cdot \tanh\left(h \cdot \sqrt{\frac{\lambda \varepsilon}{D}}\right). \quad (3.8)$$

Решив уравнение (3.8) для диапазона возможных значений коэффициента диффузии радона в КЦЗ, получаем ряд значений ППР с поверхности пористой среды (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Определение ППР с поверхности пористой среды

$\lambda, \text{с}^{-1}$	ε	$\rho, \text{кг/м}^3$	$k_{эм}$	$C_{Ra}, \text{Бк/кг}$	$D, \text{м}^2/\text{с}$	$q, \text{мБк/м}^2 \cdot \text{с}$
$2,1 \cdot 10^{-6}$	0,38	2900	0,022	3263	$1 \cdot 10^{-6}$	427
					$2 \cdot 10^{-6}$	511
					$3 \cdot 10^{-6}$	550
					$4 \cdot 10^{-6}$	573
					$5 \cdot 10^{-6}$	587
					$6 \cdot 10^{-6}$	597
					$7 \cdot 10^{-6}$	605

Ожидаемая равновесная объемная активность радона в верхней камере установки может быть найдена из соотношения

$$q = \left[A(t) - A(0) \cdot e^{-\lambda t} \right] \cdot \frac{\lambda V}{S} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (3.8)$$

в предельном переходе при $t \rightarrow \infty$.

Результаты расчета объемной активности радона $A(t)$ в таблице 3.3 не представлены, поскольку факт наступления радиоактивного равновесия устанавливался по величине ППР, непосредственно определяемой измерительным комплексом «Камера».

3.2.4 Содержание и результаты экспериментального исследования

Исследование включало в себя три этапа непрерывных измерений плотности потока радона с поверхности пористой среды и его объемной активности в верхней камере экспериментальной установки. На первом этапе данные величины определялись в условиях чисто диффузионного переноса при отсутствии перепадов давлений и температур по высоте столба КЦЗ.

Измерения объемной активности и ППР радона производились методом пассивной сорбции на многофункциональном измерительном комплексе «Камера», прошедшем метрологическую аттестацию в установленном законодательством порядке. В данном методе уголь с нулевой активностью помещался в накопительную камеру, где он накапливал выделяющийся с поверхности КЦЗ радон и приобретал определенную активность. Продолжительность экспонирования одной сорбционной колонки составляла 4 часа, после этого активность активированного угля определялась на бета-радиометре РГБ 20П2 измерительного комплекса по интенсивности бета-излучения короткоживущих дочерних продуктов радона ^{214}Pb и ^{214}Bi в состоянии равновесия. Для достижения равновесия в активированном угле между радоном и его ДПР проба помещалась в бета-радиометр через 3-12 часов после окончания экспонирования. Ежедневно перед началом измерений производилась калибровка бета-радиометра при помощи образцовых бета-источников с радионуклидами $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$.

В течение суток производилось три измерения потока радона, по результатам которых определялось среднесуточное значение. Измерения первого этапа проводились с момента сборки экспериментальной установки и до наступления радиоактивного равновесия в герметичной верхней камере.

Наступление равновесия фиксировалось по прекращению нарастания средних за неделю значений ППР, то есть по факту выполнения следующего требования

$$ППР_i \geq ППР_{i+1}, \quad (3.9)$$

где $ППР_i$ – среднее за i -ю неделю измерений значение плотности потока радона с поверхности КЦЗ, мБк/(м²·с); $ППР_{i+1}$ – среднее за $i+1$ -ю неделю измерений значение плотности потока радона с поверхности КЦЗ, мБк/(м²·с).

На начальной стадии измерений непосредственно после герметизации установки наблюдался достаточно быстрый рост ППР и активности радона в воздухе верхней камеры. Выполнение условия (3.9) было достигнуто через три недели после начала исследований, результаты измерений диффузионного потока радона, создаваемого физической моделью пористой среды, представлены на рисунке 3.12.

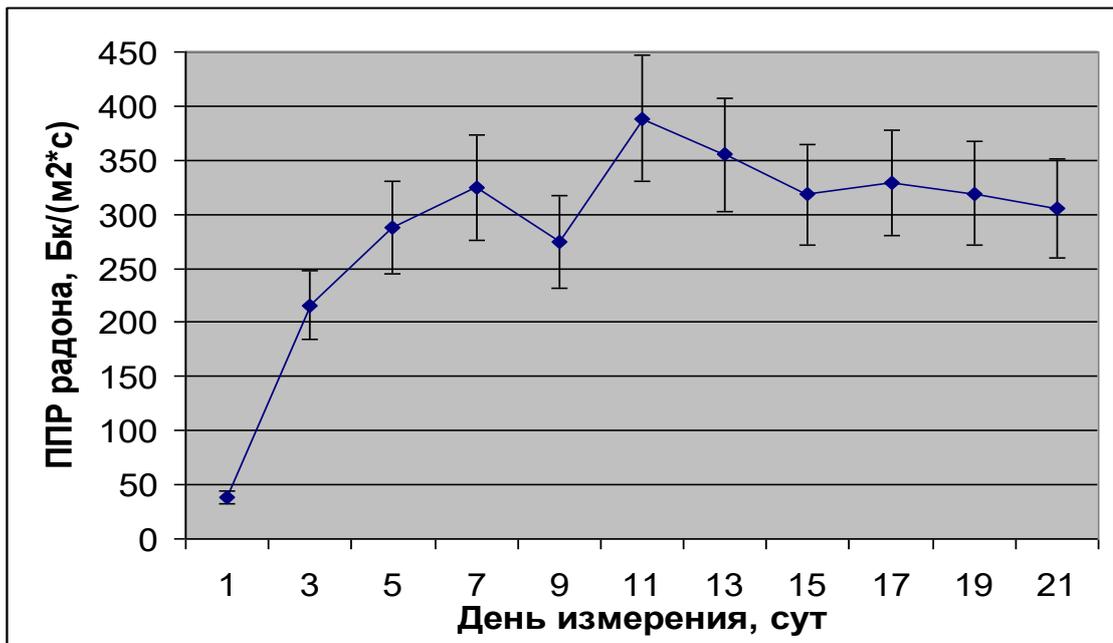


Рисунок 3.12 – Результаты измерения плотности диффузионного потока радона

Как видно из рисунка 3.12, в лабораторной установке отмечены достаточно большие значения плотности потока радона. Наряду с высокой содержанием естественных радионуклидов в циркониевом концентрате данный факт также объясняется «коэффициентом усиления» установки, заложенным в нее на стадии проектирования. Поток радона с поверхности пористой среды радиусом $r_1 = 75$ мм поступал в накопительную камеру, входное сечение которой составляло $r_2 =$

32 мм, то есть отношение площадей F_1/F_2 составляло 5,64. Наличие столь значительных потоков радона в экспериментальной установке повышает чувствительность метода регистрации эффектов, потенциально менее значимых, чем поступление радона, вызванное только молекулярной диффузией.

По результатам исследований измеренная на протяжении последней недели величина плотности потока радона с поверхности модели пористой среды составила

$$ППР_{\text{мол}} = 317,9 \pm 47,5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Расхождение с расчетными значениями, представленными в таблице 3.3, составляет от 25,5 до 47,5%. Учитывая, что для песков характерны более низкие коэффициенты диффузии ($1 \dots 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), полученные значения позволяют сделать вывод, что реализованная физическая модель адекватна реальному процессу переноса радона в пористой среде.

Второй этап измерений представлял собой изучение значимости термодиффузионных эффектов на величину переноса радона в пористой среде. Для этого в нижней камере устанавливалась избыточная температура, которая в дальнейшем поддерживалась на постоянном уровне температурным регулятором. Величина избыточной температуры составляла от 5 до 50°C с шагом в 5°C, при каждом перепаде температур производилось 12 измерений (трое суток), зависимость среднего значения ППР радона при данной разности температур от величины разности температур по столбу пористой среды представлена на рисунке 3.13.

Результаты исследования влияния термодиффузии показали тенденцию к линейному росту ППР с увеличением разности температур на границах пористой среды (достоверность линейной аппроксимации $R^2 = 0,8768$). Таким образом, необходим учет влияния термодиффузионных эффектов на перенос радона в пористой среде, при этом из уравнения аппроксимирующей кривой получается следующее выражение для коэффициента термодиффузии

$$k(\Delta T) = 1 + 0,006 \cdot \Delta T. \quad (3.10)$$

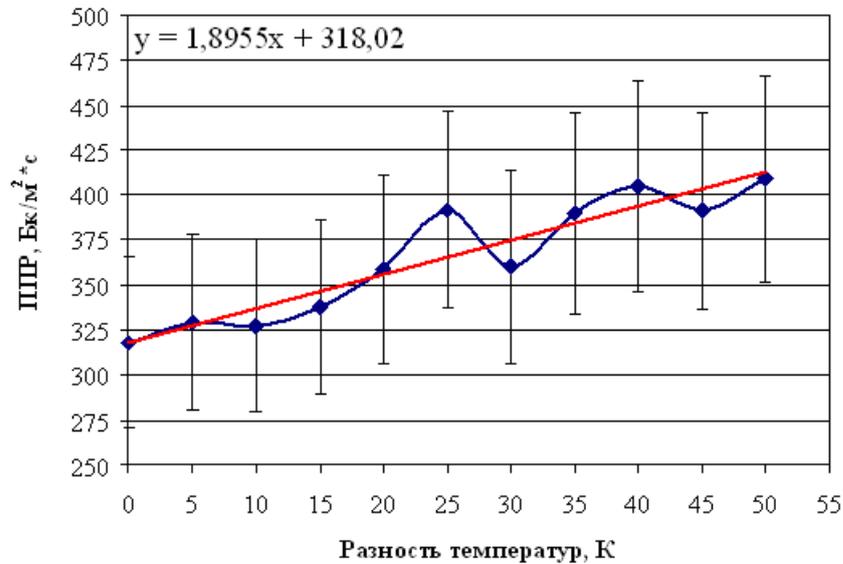


Рисунок 3.13 – Результаты измерения плотности потока молекулярной и термической диффузии

На третьем этапе исследовался вклад перепада давлений в перенос радона в пористой среде. Посредством компрессора в нижней камере экспериментальной установки создавалось избыточное давление, регулировавшееся ротаметром посредством изменения величины расхода подаваемого воздуха. Ввиду сложности точной установки постоянного перепада давлений ΔP в ходе эксперимента задавалась постоянная величина воздушного потока Q , поступающего в нижнюю камеру в единицу времени. Величины Q и ΔP однозначно связаны законом фильтрации Дарси (3.1)

$$\frac{Q}{S} = \frac{k\Delta P}{\eta L} \Rightarrow \Delta P = \frac{Q\eta L}{kS}. \quad (3.11)$$

Величина Q устанавливалась по шкале ротаметра в интервале от 100 до 1000 см³/мин с шагом в 100 см³/мин и поддерживалась неизменной на протяжении двух суток. Как и на предыдущем этапе, при каждом перепаде давлений производилось 6 измерений, результаты которых представлены в таблице 3.3. Результаты исследования переноса радона под действием перепада давлений показали колебание значений ППР радона в пределах погрешности измерения данной величины в условиях молекулярной диффузии. Статистически значимая разница результатов измерений ППР имеет место при перепадах

давлений $\Delta P \geq 50$ Па. Поскольку в реальных зданиях температурно-индуцированный перепад давлений чаще всего не превышает 3-5 Па, то нет необходимости во введении коэффициента $k(\Delta P)$, учитывающего влияние бародиффузии на процесс поступления радона в здания.

Таблица 3.3 – Результаты исследования бародиффузионного переноса радона

Q , см ³ /мин	ΔP , Па	k , м ²	ППР, мБк/(м ² ·с)
0	0	10 ⁻¹⁰	317,9
100	8		310,6
200	16		325,4
300	24		320,4
400	32		335,0
500	40		333,7
600	48		329,5
700	56		334,1
800	64		355,5
900	72		369,3
1000	80		375,3

3.3 Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Результаты радиационного мониторинга застройки города Луганска показали, что превышение контрольного уровня для среднегодовой ЭРОА имеет место в зданиях на грунтах со средним содержанием естественных радионуклидов. Подобная ситуация может свидетельствовать о том, что:

- проблема облучения радоном в зданиях актуальна и для потенциально нерадоноопасных равнинных территорий, на долю которых приходится около 75% территории Российской Федерации;

- оценка потенциальной радоноопасности участка застройки только на основании физических характеристик грунта (по величине ППР) неэффективна, необходим также и анализ конструктивных особенностей основания здания.

2. Разработана физическая модель пористой среды, адекватность которой подтверждена сопоставлением результатов измерений плотности потока радона в экспериментальной установке с результатами аналитического решения задачи одномерного переноса радона в пористой среде.

3. Исследования с помощью физической модели показали несущественность вклада бародиффузии в процесс переноса радона в пористых средах, в то время как термодиффузионные эффекты приводят к статистически значимому увеличению плотности потока радона с поверхности грунта при перепадах температур, характерных для реальных условий эксплуатации зданий.

4. Экспериментальные исследования показали возможность использования «эквивалентного» коэффициента диффузии вместо коэффициента молекулярной диффузии в виде

$$D_{\text{экв}} = k(\Delta T) \cdot D = (1 + 0,006 \cdot \Delta T) \cdot D.$$

Использование «эквивалентного» коэффициента диффузии радона позволяет использовать при разработке математической модели закон Фика для чисто молекулярной диффузии, что существенно упрощает математическое описание процесса переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание».

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАДОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗДАНИИ

4.1 Формулировка и решение краевой задачи переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание»

Здание вместе с окружающей его геологической и воздушной средой представляет сложную природно-техногенную систему «грунт-атмосфера-здание», свойства которой не могут быть получены суперпозицией свойств отдельных элементов.. В системе «грунт-атмосфера-здание» протекают различные по своей природе процессы генерации радона, его диффузионного поступления через горизонтальные подземные ограждающие конструкции здания и инфильтрационного поступления с наружным воздухом, а также стока радона вследствие радиоактивного распада и удаления средствами вентиляции и кондиционирования.

Целью настоящей главы является разработка математической модели, адекватно описывающей процесс формирования радоновой обстановки в помещении современных зданий. При построении модели используем следующие допущения:

- источниками радона являются грунт под зданием, материалы ограждающих конструкций и поступающий наружный воздух;
- перенос радона в грунте и материалах ограждающих конструкций осуществляется исключительно посредством молекулярной диффузии, в уравнение которой входит «эквивалентный» коэффициент диффузии вместо объемного;
- поступивший радон мгновенно и равномерно распределяется по объему помещения;
- отсутствует горизонтальный перенос радона из почвы через вертикальные подземные ограждающие конструкции;
- отсутствует перенос радона из помещения нижнего этажа на верхние;

- ширина здания значительно меньше его длины, а само здание симметрично, что позволяет рассматривать половину его длины.

На рисунке 4.1 представлена ситуационная и расчетная схемы рассматриваемой задачи [173].

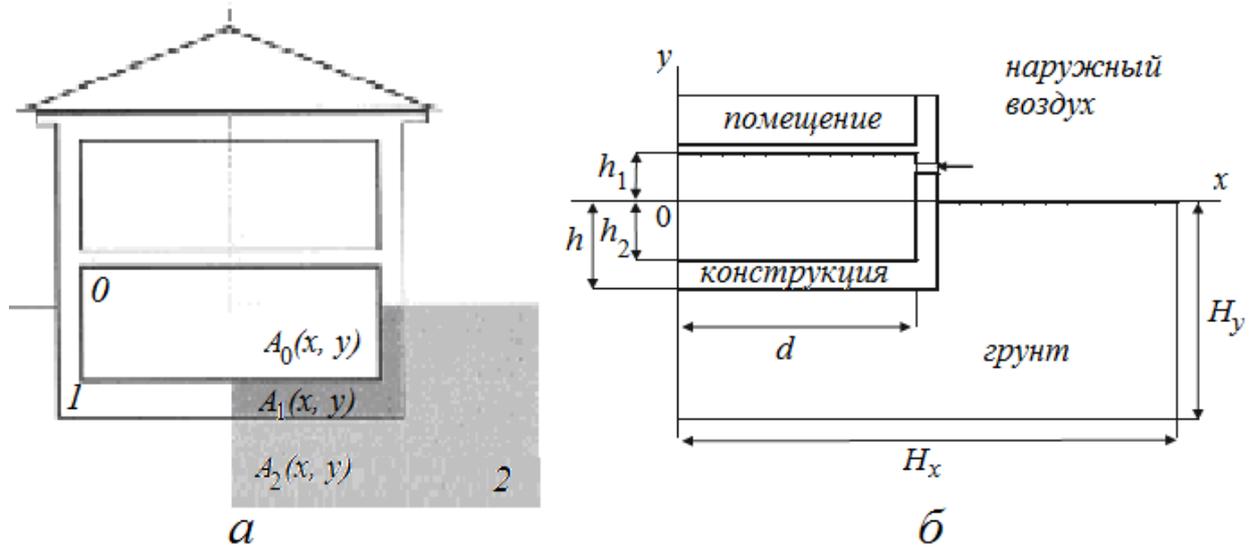


Рисунок 4.1 – Ситуационная схема (а) и схема привязки элементов системы к координатным осям (б) [173]

Перенос радона в системе «грунт-атмосфера-здание» описываем системой линейных уравнений [173; 176]

$$D_0 \left(\frac{\partial^2 A_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_0}{\partial y^2} \right) - (\lambda + \lambda_g) \cdot A_0 + G_0 = 0, \text{ при } 0 \leq x \leq d, -h_2 \leq y \leq h_2; \quad (4.1)$$

$$D_1 \left(\frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A_1 + G_1 = 0, \text{ при } 0 \leq x \leq d, -h \leq y \leq -h_2; \quad (4.2)$$

$$D_2 \left(\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A_2 + G_2 = 0, \text{ при } d \leq x \leq H_x, -h \leq y \leq 0; \quad (4.3)$$

$$0 \leq x \leq H_x, -H_y \leq y \leq h;$$

где D_0 , D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии радона в воздухе, материале конструкции и грунте, соответственно, $\text{м}^2/\text{с}$;

A_0 , A_1 и A_2 – объемные активности радона в воздухе помещения, материале конструкции и почвенном воздухе, соответственно, $\text{Бк}/\text{м}^3$;

G_0 , G_1 и G_2 – скорость образования радона в воздухе помещения, материале конструкции и почвенном воздухе, соответственно, Бк/(м³·с);

$\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6}$ – постоянная распада радона, с⁻¹;

λ_6 – кратность воздухообмена, с⁻¹; d – половина ширины здания, м;

h – точка пересечения оси ординат плоскостью контакта конструкции пола с грунтом, м;

h_1 и h_2 – точка пересечения оси ординат плоскостью потолка и пола, соответственно, м;

H_x – максимальное расстояние от оси здания, на котором существуют искажения радонового поля, вызванные влиянием здания, м;

H_y – максимальная глубина, с которой радон достигает основания здания, м.

Для рассматриваемой системы граничные условия будут иметь вид:

- объемная активность радона в воздухе постоянна на вертикальных и горизонтальных границах помещения;

$$\frac{\partial A_0}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = 0, -h_2 \leq y \leq h_1; \quad (4.4)$$

$$x = d, -h_2 \leq y \leq h_1;$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, y = h_1; \quad (4.5)$$

- отсутствует поступление радона через вертикальные подземные ограждающие конструкции;

$$\frac{\partial A_2}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = d, -h \leq y \leq 0; \quad (4.6)$$

- равенство потоков на границе раздела «ограждающая конструкция – воздух помещения»

$$D_1 \frac{\partial A_1}{\partial y} = D_0 \frac{\partial A_0}{\partial y}, \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, y = -h_2; \quad (4.7)$$

- равенство потоков и активностей на границе раздела «ограждающая конструкция – грунт под зданием»

$$D_1 \frac{\partial A_1}{\partial y} = D_2 \frac{\partial A_2}{\partial y}, \quad A_1 = A_2 \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, y = -h; \quad (4.8)$$

- отсутствует поток радона на нижней границе области 2

$$\frac{\partial A_2}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x \leq H_x, y = -H_y; \quad (4.9)$$

- отсутствует поток радона на правой границе области 2

$$\frac{\partial A_2}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = H_x, -H_y \leq y \leq 0; \quad (4.10)$$

- условие газообмена на границе «грунт-атмосфера»

$$D_2 \frac{\partial A_2}{\partial y} = \alpha(A_2 - A_n), \quad \text{при } d \leq x \leq H_x, y = 0. \quad (4.11)$$

где α – коэффициент газообмена на поверхности грунта;

A_n – объемная активность радона в атмосферном воздухе, Бк/м³.

Генерация радона в материалах, вошедшая в уравнения (4.1) – (4.3), может быть записана в виде

$$G_0 = \frac{q_{cm}F}{V} + A_n \lambda_g; \quad G_1 = C_1 \rho_1 k_1 \lambda; \quad G_2 = C_2 \rho_2 k_2 \lambda, \quad (4.12)$$

где q_{cm} – плотность потока эксхалации радона из материалов ограждающих конструкций, Бк/(м²·с);

F – общая площадь внутренних поверхностей ограждающих конструкций, м²;

V – объем помещения, м³;

C_1 и C_2 – удельная активность радия в материале ограждающих конструкций и грунте, соответственно, Бк/кг;

k_1 и k_2 – коэффициенты эманирования радона в материале ограждающих конструкций и грунте, соответственно;

ρ_1 и ρ_2 – плотность материала ограждающих конструкций и грунта, соответственно, кг/м³.

Для каждого уравнения (4.1) – (4.3) с соответствующими граничными условиями применяется метод разделения переменных, при котором решения $A(x, y)$ ищутся в виде

$$A(x, y) = \frac{G_s}{\lambda} \left(1 - N_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D_s}} y} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(p_n(s) \cos(u_n(s)(x - a_1(s))) (R_n e^{v_n(s)(y - b_1(s))} + e^{-v_n(s)(y - b_1(s))}) + q_n(s) \cos(u_n(s)(y - a_2(s))) \cdot \cosh(v_n(s)(x - b_2(s))) \right), \quad (4.13)$$

где $p_n(s)$, $q_n(s)$, $n = 0, 1, 2, \dots$; $s = 0, 1, 2$ – неопределенные коэффициенты.

Неопределенные коэффициенты находятся путём замены рядов в (4.13) конечными суммами и решения системы линейных уравнений, которые получаются после приравнивания значений $A(x, y)$ и ее производной на общих границах смежных областей. Значения $A(x, y)$ и других величин вычисляются с помощью программы MAPLE, представленной в *Приложении 4*.

4.2 Содержание и результаты модельного исследования

Как было отмечено выше, на процесс формирования радоновой обстановки в здании оказывает влияние целый ряд факторов разнонаправленного действия, управлять которыми можно только в рамках математического моделирования. Разработанная математическая модель переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» использовалась для изучения значимости и направления действия этих факторов. В процессе моделирования изменялся только один из параметров, остальные при этом оставались постоянными. Исследуемые параметры и диапазоны их вариаций представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Диапазоны вариаций параметров, оказывающих влияние на формирование радоновой обстановки в здании

Параметр	Единица измерения	Значение	
		<i>min</i>	<i>max</i>
Половина ширины здания, d	м	3	18
Заглубление здания, h	м	0	6,6
Высота помещения, h_1	м	3	3,5
Глубина помещения относительно уровня земли, h_2	м	0	6,5
Коэффициент диффузии материала конструкции, D_1	м ² /с	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент диффузии грунта, D_2	м ² /с	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$
Удельная активность радия в грунте C_2	Бк/кг	30	180

Поскольку радоновый потенциал грунта достигается на глубине 5-10 м, то в общем случае радоновая нагрузка на подземные горизонтальные ограждающие конструкции (среднее значение концентрации радона в плоскости контакта конструкции пола с грунтом) N_{cp} будет меньше. Из рисунка 4.2, а видно, что величина радоновой нагрузки возрастает прямо пропорционально возрастанию радонового потенциала грунта. Значение коэффициента пропорциональности ($k_{np} < 1$) зависит от сопротивления радонопроницанию R конструкции пола, заглубления h и ширины здания. Однако, учитывая принятые при разработке модели упрощения, при проектировании расчетную радоновую нагрузку N_{cp} рекомендуется принимать равной радоновому потенциалу грунта Π_{Rn} .

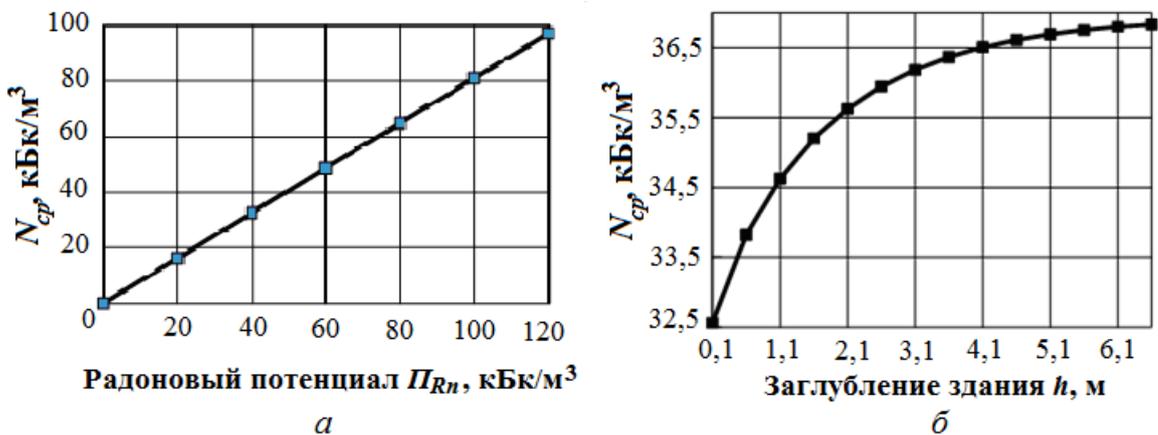


Рисунок 4.2 – Зависимость радоновой нагрузки на основание здания: а – от радонового потенциала грунта Π_{Rn} ; б – от заглубления здания h

На рисунке 4.2, б можно видеть, что радоновая нагрузка нелинейно возрастает по мере увеличения заглубления здания и стремится к некоторой постоянной величине. Это можно объяснить следующим образом: увеличение сопротивления радонопроницанию снижает поступление радона в здание, вследствие чего концентрация радона в грунте под зданием повышается. В случае достаточно большого значений сопротивления радонопроницанию R или заглубления h радоновая нагрузка на конструкцию максимально приблизится к своему пределу – значению радонового потенциала грунта Π_{Rn} .

Зависимости радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции от ширины здания и коэффициента диффузии радона в грунте показаны на рисунке 4.3.

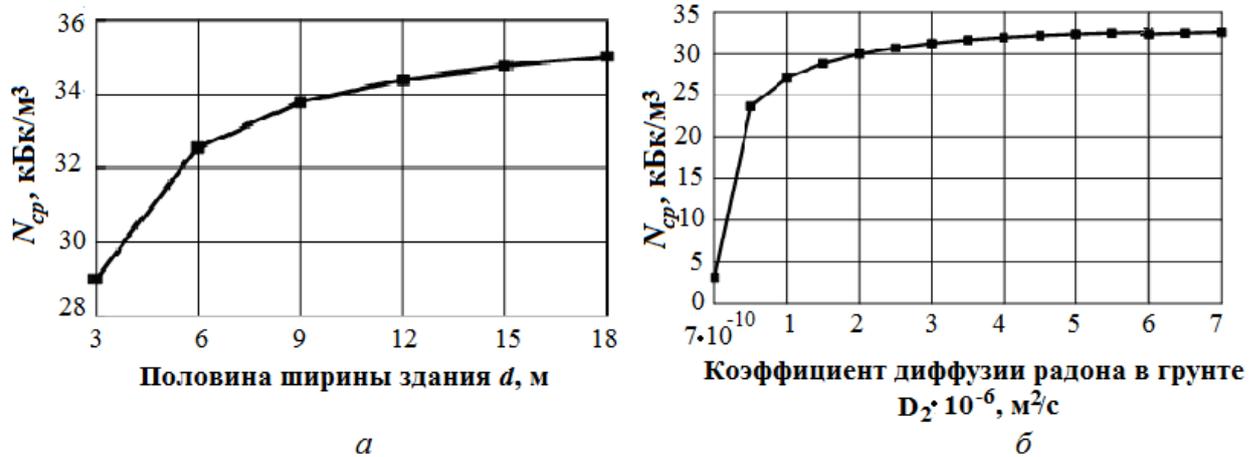


Рисунок 4.3 – Зависимость радоновой нагрузки на основание здания: *a* – от ширины здания; *б* – от коэффициента диффузии радона в грунте

Из рисунка 4.3, *a* видно, что с увеличением ширины здания растет радоновая нагрузка на подземные ограждающие конструкции. Это можно объяснить снижением бокового оттока радона из-под здания в сторону более проницаемого открытого грунта. Зависимость радоновой нагрузки от коэффициента диффузии радона в грунте представлена на рисунке 4.3, *б*. В малопроницаемых грунтах ($k \leq 10^{-12}$ м²) низкие значения N_{cp} связаны с малой мощностью «активного слоя» грунта, формирующего радоновую нагрузку, в высокопроницаемых грунтах данная зависимость становится малозначимой.

Разработанная модель позволяет находить поле концентраций радона в грунте под зданием. На рисунке 4.4 представлены изолинии концентрации радона в грунте, определенные при коэффициенте диффузии $D_2 = 5 \cdot 10^{-8}$ м²/с для заглублений здания 3 и 6 м, соответственно. Нижняя (жирная) линия представляет собой радоновый потенциал грунта, в данном случае равный 45 000 Бк/м³, значения остальных линий убывают по направлению к поверхности грунта с шагом 1 000 Бк/м³.

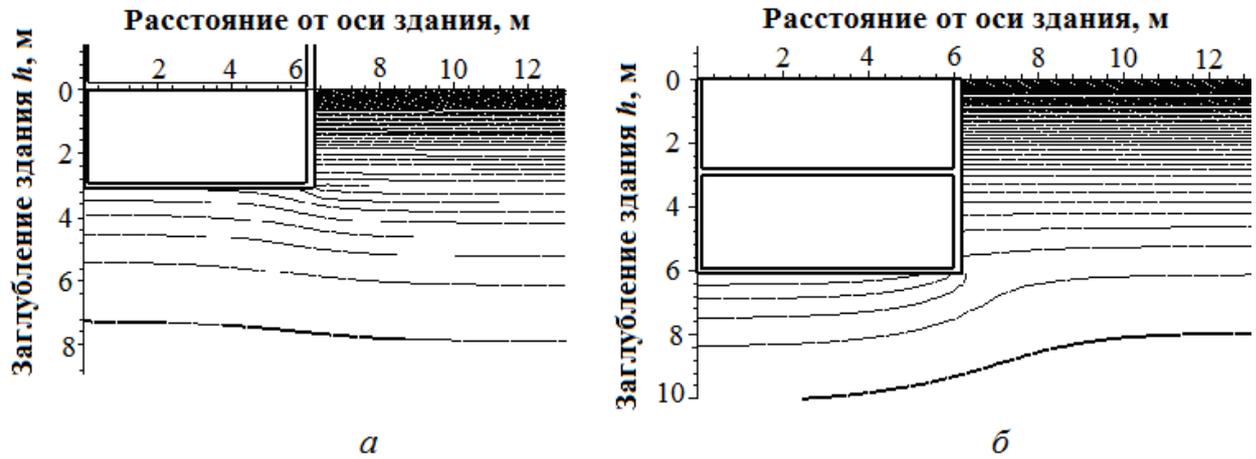
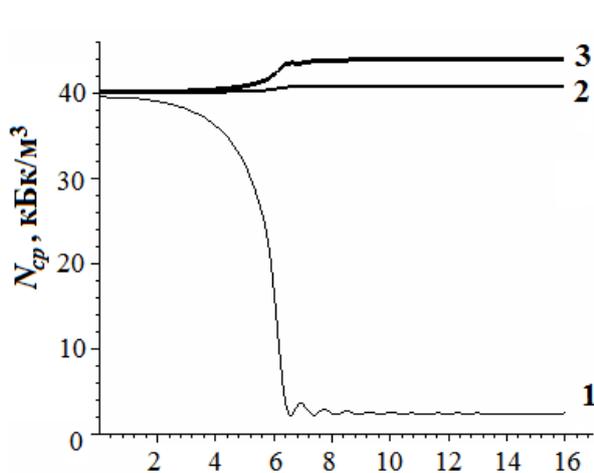


Рисунок 4.4 – Изолинии концентрации радона в грунте при заглублении здания: *a* – 3 м; *б* – 6 м

Как видно из рисунка 4.4, здание существенно изменяет природное распределение радона в грунте (изолинии параллельны поверхности земли). Из-за того, что здание препятствует разгрузке радона в атмосферу, для плоскости контакта конструкции с грунтом характерны более высокие значения концентрации радона, чем в нескольких метрах за пределами здания, где поле концентраций остается ненарушенным. Причем искажения поля концентраций тем сильнее, чем больше заглубление здания.

На рисунке 4.5 показано изменение радоновой нагрузки в плоскости контакта конструкции пола с грунтом по мере удаления от оси здания при заглублениях здания 0,1 (плита на грунте), 4 и 6 м. Можно видеть, что при



небольших заглублениях максимальная концентрация радона достаточно быстро убывает с удалением от оси здания, в то время как для больших заглублений такая зависимость практически не выражена.

Рисунок 4.5 – Распределение концентрации радона в плоскости контакта основания здания с грунтом при заглублении: 1 – 0,1 м; 2 – 3 м; 3 – 6 м

Проведенное модельное исследование показывает, что из всех факторов, определяющих величину радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции, существенную роль играют радоновый потенциал грунта и его радонопроницаемость. Влияние заглубления здания и его ширины проявляется только в случае их малых значений.

4.3 Методика проектного расчета радонозащитных характеристик горизонтальных подземных ограждающих конструкций

Величина ЭРОА радона в помещении практически полностью определяется плотностью потока радона Q , поступающего из грунтового основания через конструкцию пола [174; 175]. Таким образом, непревышение некоторой предельной величины $Q_{дон}$ гарантирует обеспечение заданной при проектировании величины ЭРОА. Предельная величина ППР из грунта определяется радоновой нагрузкой на основание здания и сопротивлением радонопроницанию конструкции пола R (рисунок 4.6)

$$Q_{дон} = \frac{N_{cp}}{R}. \quad (4.14)$$

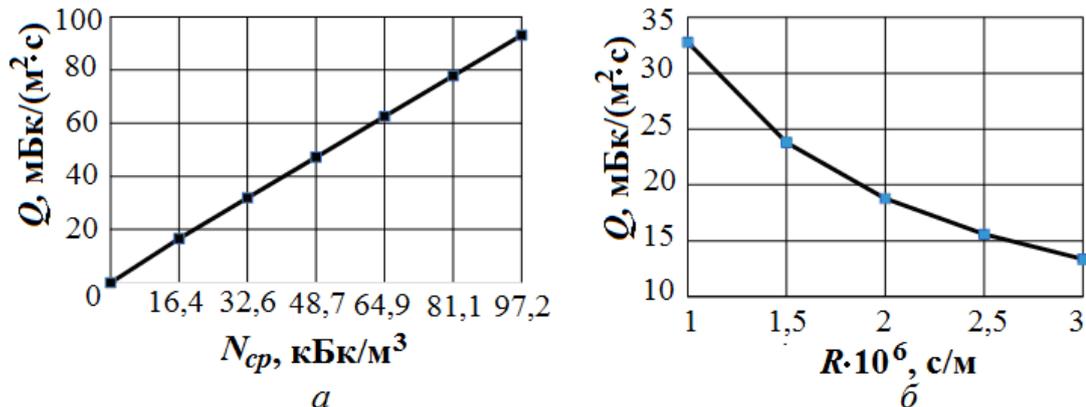


Рисунок 4.6 – Зависимость плотности потока радона, поступающего в здание через конструкцию пола: а – от радоновой нагрузки при $0 \leq C_{Ra,2} \leq 180$ Бк/кг; б – от сопротивления радонопроницанию конструкции пола

Из рисунка 4.6, а видно, что при прочих равных условиях поступление радона через конструкцию пола возрастает прямо пропорционально величине радоновой нагрузки. При этом значение коэффициента пропорциональности

определяется сопротивлением радонопроницанию конструкции пола. Согласно рисунка 4.6, Q величина Q нелинейно снижается по мере увеличения сопротивления радонопроницанию конструкции и стремится к нулю при $R \rightarrow \infty$.

При проектировании противорадовой защиты здания величина сопротивления радонопроницанию конструкции пола играет ключевое значение, поскольку именно она ограничивает количество поступающего радона. На рисунке 4.7, *а* показана зависимость величины сопротивления радонопроницанию бетонной плиты от ее толщины.

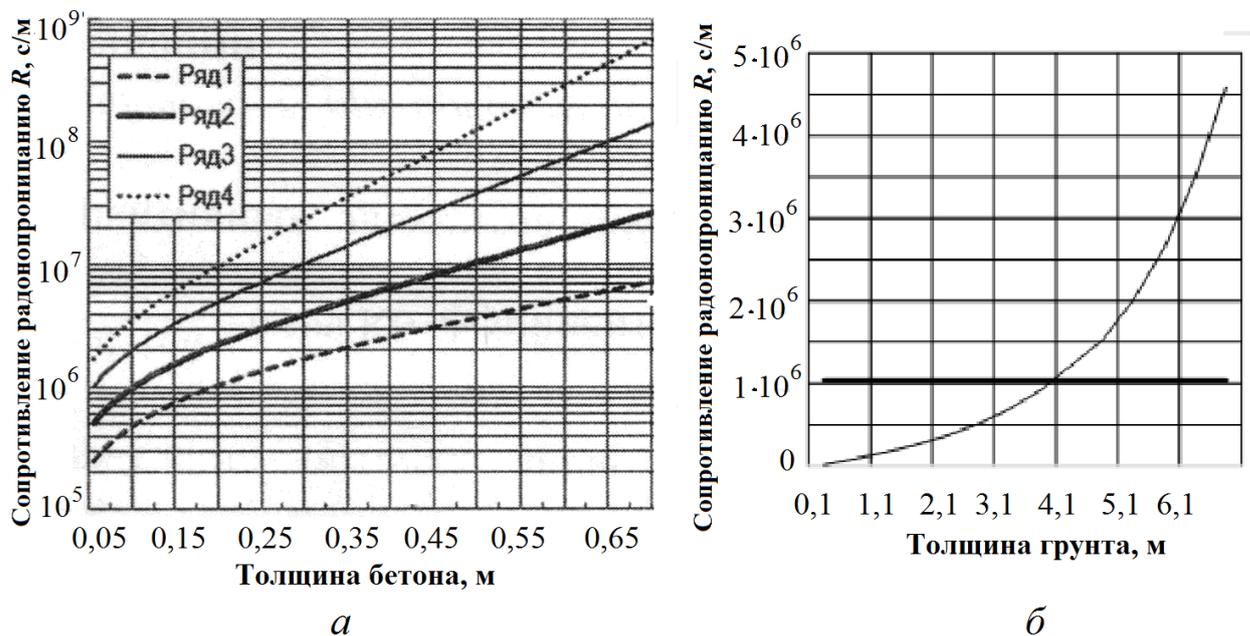


Рисунок 4.7 – Сопротивление радонопроницанию материалов: а – бетонной плиты; б – слоя грунта. Ряды: 1 – $D = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $D = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $D = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; 4 – $D = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$

Сопротивление радонопроницанию R однослойной бетонной плиты нелинейно возрастает с ростом толщины, так как определяется выражением [177]

$$R = \frac{1}{\sqrt{D\lambda}} \cdot sh\left(\delta \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right), \quad (4.15)$$

где δ – толщина плиты, м.

Не менее важен учет сопротивления радонопроницанию грунта при возведении многоэтажных зданий. Точка пересечения кривых на рисунке 4.7, б соответствует такому заглублению здания, при котором равны сопротивление радонопроницанию конструкции пола (жирная линия) и массива грунта. Если же

сопротивление грунта станет больше, возникнет боковой приток радона из грунта под здание и, тем самым, увеличится радоновая нагрузка на ограждающие конструкции.

Если конструкция пола образована несколькими слоями, оказывающими сопротивление радонопроницанию, то при расчетах сначала определяется эквивалентное сопротивление радонопроницанию конструкции пола. Чаще всего радонозащитная способность здания определяется свойствами двух слоев (бетон и гидрогазоизоляция), для этого случая

$$R_2 = \frac{L_2}{D_2} \cdot ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + \frac{D_2 \cdot L_1}{D_1 \cdot L_2} sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right), \quad (4.16)$$

где h_1 и h_2 – толщина верхнего и нижнего слоя материала, м;

D_1 и D_2 – коэффициент диффузии радона в материале верхнего и нижнего слоя, м²/с;

L_1 и L_2 – длина диффузии радона в материале верхнего и нижнего слоя, м, определяемая по формулам

$$L_1 = \sqrt{\frac{D_1}{\lambda}}, \quad L_2 = \sqrt{\frac{D_2}{\lambda}}. \quad (4.17)$$

На основе описанной математической модели разработана методика по определению оптимальных радонозащитных характеристик подземных горизонтальных ограждающих конструкций, алгоритм которой представлен на рисунке 4.8. Поскольку в отдельных случаях конструкция пола может включать до шести различных слоев, в программе предусмотрено задание свойств именно шести слоев и грунтового массива под зданием глубиной 10 м. Если же конструкция пола образована меньшим числом слоев, остальным задаются свойства грунтового массива, а их толщина отнимается от 10 м. Кроме того, программа позволяет одновременно просчитывать до шести различных вариантов конструкции пола здания, что позволяет сравнить различные проектные решения.

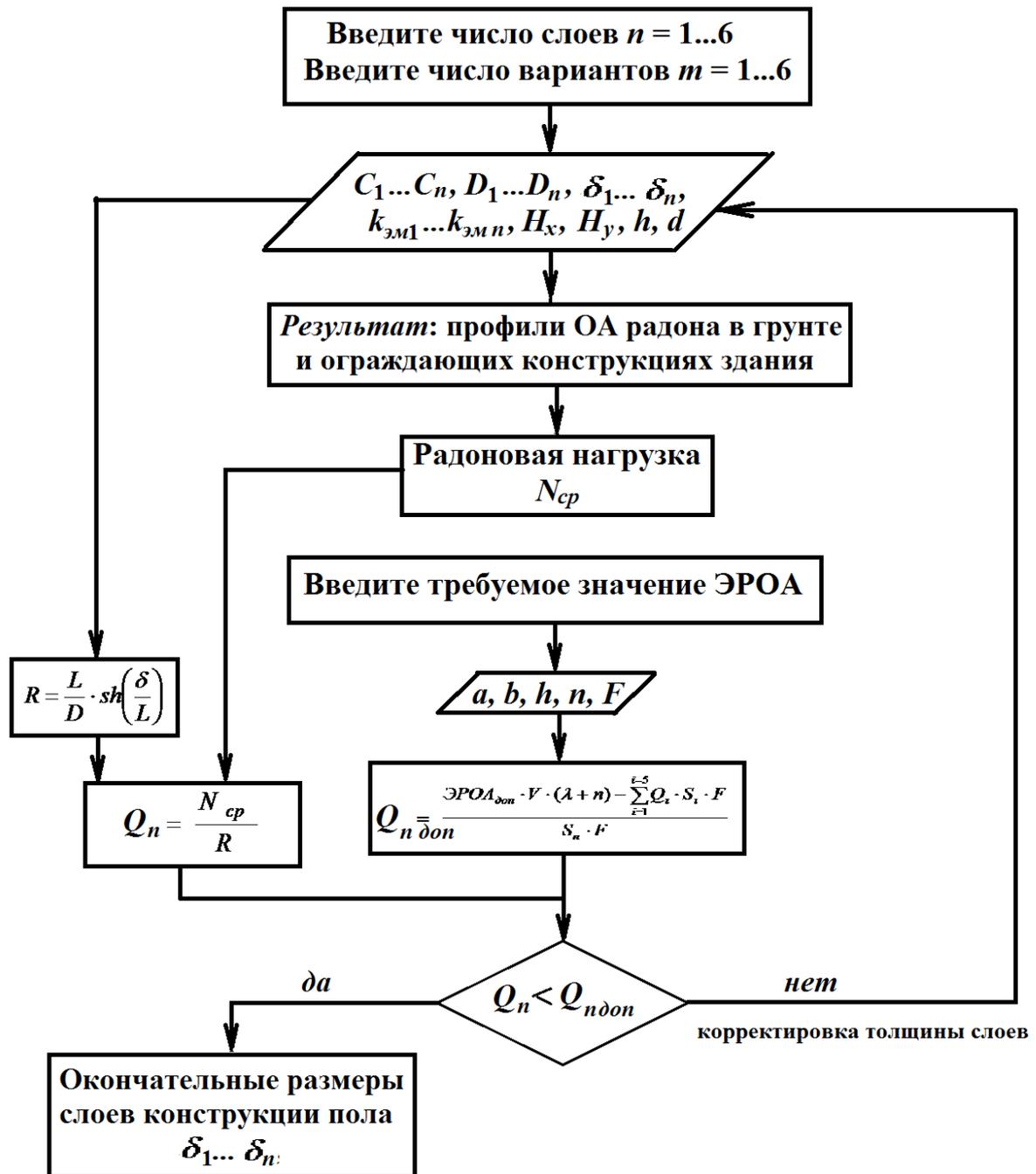


Рисунок 4.8 – Алгоритм расчета характеристик подземных ограждающих конструкций

4.4 Выводы

Результаты проведенного модельного исследования позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Уровень радона в здании в первую очередь зависит от сопротивления радонопроницанию конструкции пола и радоновой нагрузки на подземные горизонтальные ограждающие конструкции. Сопротивление радонопроницанию

конструкции может регулироваться посредством изменения толщины бетонного слоя или применения материалов с соответствующими физическими характеристиками.

2. При проектировании противорадоновой защиты здания минимальное значение требуемого сопротивления радонопроницанию конструкции следует определять исходя из расчетной радоновой нагрузки и заданного допустимого уровня концентрации радона в здании.

3. При проектировании заглубленных зданий для исключения бокового притока радона из грунта под конструкцию пола сопротивление радонопроницанию конструкции должно быть больше, чем сопротивление слоя грунта толщиной, равной заглублению здания.

4. Основными факторами, определяющими радоновую нагрузку на основание здания, являются радоновый потенциал грунта и его радонопроницаемость. Зависимость радоновой нагрузки от заглубления и ширины здания заметно проявляется только в случаях их наиболее низких значений, при строительстве современных многоквартирных зданий эта зависимость малозначима и ее можно не учитывать.

5. Учитывая принятые при создании модели упрощения, расчетную радоновую нагрузку на подземные ограждающие конструкции N_{cp} можно принимать равной радоновому потенциалу грунта $П_{Rn}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что в диссертации получили существенное развитие научные основы обеспечения радоновой безопасности зданий на стадии их проектирования, основанные на принципах математического моделирования, позволяющего повысить достоверность определения радонозащитных свойств подземных ограждающих конструкций.

По результатам выполненных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие *выводы*:

- определено, что грунтовое основание здания является основным источником радона в воздухе помещений, поэтому радонозащитные свойства зданий должны обеспечиваться подземными ограждающими конструкциями;

- на основе анализа известных математических моделей поступления радона в здания обоснован диффузионный механизм переноса радона из грунтового основания в воздух помещений;

- радиационный мониторинг городской застройки Луганска подтвердил значимость проблемы облучения населения радоном в зданиях равнинных потенциально нерадоноопасных территорий и необходимость учета особенностей конструкции пола при оценке потенциальной радоноопасности участка застройки (наряду с геофизическими характеристиками грунтового основания);

- по результатам лабораторного эксперимента показана необходимость учета разности температур на границах горизонтальной подземной ограждающей конструкции при моделировании поступления радона в здания. Также показана несущественность влияния эффектов бародиффузии на перенос радона;

- с целью упрощения математической постановки задачи предложено введение «эквивалентного» коэффициента диффузии радона в материале, учитывающего вклад термодиффузии в процесс поступления радона в здания;

- разработана математическая модель двухмерного стационарного диффузионного переноса радона, рассматривающая грунт, атмосферу и здание как единую систему, состоящую из взаимодействующих подсистем;
- выполнено численное исследование значимости и направления действия основных факторов, оказывающих влияние на перенос радона в здание;
- на основе математической модели разработана методика проектного расчета оптимальных радонозащитных характеристик горизонтальных подземных ограждающих конструкций зданий.

Предлагаются следующие *рекомендации*:

- использовать предложенную методику при проектировании подземных горизонтальных ограждающих конструкций здания;
- при проектировании заглубленных зданий производить сравнительную оценку сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций и слоя грунта с толщиной, равной заглублению здания во избежание бокового притока радона под здание.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- расширение области адекватности модели с целью описания поступления радона в здания, отличающиеся по радонозащитным свойствам от проектируемых (частное жилье с подвальными помещениями из кладочных материалов, дома с подвалами под частью здания и т.д.);
- детальное изучение поведения каждого из факторов формирования радоновой обстановки в здании на основании сопоставления модельных расчетов и результатов исследований процесса переноса радона на экспериментальной установке;
- теоретическое и экспериментальное исследование условий существования системы «грунт-атмосфера-здание», при которых описание поступления радона в здания возможно на основе диффузионной модели;
- разработка методики определения сопротивления радонопроницанию строительных материалов с использованием экспериментальной установки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA SAFETY STANDARDS for protecting people and the environment. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Natural Sources of Radiation. Draft Safety Guide No. DS421. – Vienna, April 2012. – 92 p.
2. Ильичев, В.А. Инновационная практика в городах и доктрина градостроительства [Текст] / В.А. Ильичев, С.Г. Емельянов, В.И. Колчунов, Н.В. Бакаева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. – № 3 (7). – С. 3-18.
3. Сидякин, П.А. Организация мониторинга содержания мелкодисперсных частиц пыли в воздушной среде городов-курортов [Текст] / П.А. Сидякин, Т.Н. Лопатина, Е.А. Калюжина, А.В. Нестерчук, Н.В. Вахилевич // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 1 .- С. 214.
4. Сидякин, П.А. Техногенное загрязнение атмосферного воздуха и его влияние на социально-экологическое благополучие городов-курортов Кавказских Минеральных Вод [Текст] / В.Н. Азаров, П.А. Сидякин, Т.Н. Лопатина, Д.А. Николенко // Социология города. - 2014. - № 1. - С. 28-37.
5. Яблоков, А.В. Миф о безопасности малых доз радиации: Атомная мифология / А.В. Яблоков. – М.: Центр экологической политики России, ООО «Проект-Ф», 2002. – 145 с.
6. Гулабянц, Л.А. Роль радона в сфере жизнедеятельности человека [Текст] // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – № 4. – 2013. – С. 78-82.
7. Сидельникова, О.П. Радиационно-экологические аспекты при строительстве зданий [Текст] // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2013. № 2. С. 65-69.
8. Мирончик, А.Ф. Естественные радиоактивные вещества в атмосфере и воздухе жилых помещений Республики Беларусь [Текст] // Вестник Белорусско-Российского университета. – № 4 (17). – 2007. – С. 162-171.
9. Павленко, Т.А. Оценка облучения населения Запорожской области [Текст] / Т.А. Павленко, М.И. Костянецкий, Н.В. Аксенов // Радіаційна медицина. 2006. Т. 10. № 1. С. 103-106.

10. Диденко, П.И. Влияние радона на население Украины [Текст] // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. 2012. № 4. – С. 60-67.
11. Клинская, Е.О. Содержание радона в воздухе помещений Еврейской автономной области [Текст] / Е.О. Клинская, Н.К. Христофорова // Радиационная гигиена. 2012. – Т. 5. № 1. С. 20 – 24.
12. Кормановская, Т.А. Дозы природного облучения населения Сибирского Федерального Округа [Текст] // Вести МАНЭБ в Омской области. 2013. – № 3. С. 13-16.
13. Мирончик, А.Ф. Естественные радиоактивные вещества в атмосфере и воздухе жилых помещений Республики Беларусь [Текст] // Вестник Белорусско-Российского университета. 2007. – № 4 (17). С. 162-171.
14. Севальнев, А.І. Обмеження опромінення людини за рахунок радону в контексті історичного розвитку цього питання [Текст] / А.І. Севальнев, М.І. Костенецький, А.В. Куцак, Л.В. Шаравара // Запорожский медицинский журнал. 2011. – Т. 13. № 1. С. 41 – 43.
15. Тихонов, М.Н. Радонная опасность: источники, дозы и нерешенные вопросы / М.Н. Тихонов. – М.: ВИНТИ, 2008. – Вып.3. – С. 29-51. – (Обзорная информация / Экол. Экспертиза).
16. Яρμοшенко, И.В. Обследование уровней накопления радона в жилых зданиях города Екатеринбурга / И.В. Яρμοшенко, А.Д. Онищенко, М.В. Жуковский // Вопросы радиационной безопасности. – 2010. – № 3(59). С. 62-69.
17. Жуковский, М.В. Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение / М.В. Жуковский, А.В. Васильев // АНРИ. – 2012. – № 1. С. 3-12.
18. Васильев, А.В. Исследование механизмов и источников поступления радона в здания, построенные по современным технологиям / А.В. Васильев, М.В. Жуковский, А.Д. Онищенко, А.А. Вишневский // Применение изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения: сборник докладов IV науч.-практ. семинара. Екатеринбург, 5 декабря 2012 г. С. 4-13.

19. Цапалов, А.А. Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля // АНРИ. – 2010. – № 2. – С. 2-14.
20. Цапалов, А.А. Принципы оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений / А.А. Цапалов, А.П. Ермилов, Л.А. Гулабянц, А.Т. Губин, С.И. Кувшинников // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3. № 3. – С. 23-27.
21. Сидельникова, О.П. Radiation-related hygienic assessment of construction materials in urbanized complexes in the Volgograd region / О.П. Сидельникова, Л.И. Хорзова, П.А. Сидякин // Spatium. - 2016. - № 36, December. - С. 46-54.
22. Очкин, А.В. Введение в радиозкологию. Учеб. Пособие для вузов / А.В. Очкин, Н.С. Бабаев, Э.П. Магомедбеков. – М.: ИздАТ, 2003. – 200 с.
23. Сидельникова, О.П. Радиационно-экологическая безопасность строительных материалов, производимых в Волгоградской области / О.П. Сидельникова // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Сер. Строительство и архитектура. - 2016. - Вып. 44 (63), ч. 2. - С. 43-51.
24. Цапалов, А.А. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А.А. Цапалов, С.И. Кувшинников // АНРИ. – 2008. – № 2(53). – С. 37-43.
25. Яковлева, В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: монография / В.С. Яковлева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 174 с.
26. Андреев, А.И. Экспериментальные исследования динамики поступления радона в служебные помещения / А.И. Андреев, М.Б. Медведева // Вестник ТОГУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 3 (22). С. 37-45.
27. Кургуз, С.А. Влияние физических свойств радона на его распределение внутри зданий и помещений // Радиозкология XXI века: материалы междунар. науч.-практ. Конф., Красноярск, 14 – 16 мая 2012. – Красноярск: СФУ, 2012. – С.145-150.
28. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 119 с.

29. Радоновая безопасность зданий / М.В. Жуковский [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 230 с.
30. Бекман, И.Н. Радон: враг, врач и помощник. Конспект лекций. <http://profbeckman.narod.ru/rad.htm>.
31. Darby, S., Hill, D., Doll, R. Radon: A likely carcinogen at all exposures. *Ann. of Oncology*. 2001. No. 12. Pp. 1341-1351.
32. Chen, J., Moir D., Pronk, T., et. Al. An update on thoron exposure in Canada with simultaneous ^{222}Rn and ^{220}Rn measurements in Fredericton and Halifax. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 147(4). Pp. 541-547.
33. Valmari, T., Arvela, H., Reisbacka, H. Radon in Finnish apartment buildings. *Radiat. Prot. Dosim.* 2012. No. 152(2-3). Pp.146-149.
34. Arvela, H., Holmgren, O., Reisbacka, H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009. *Radiat. Prot. Dosim.* 2010. No. 148 (4). Pp. 465-474.
35. Tokonami, S. Radon and thoron exposures for vase residents in Shanxi and Shanxi Provinces. *Radiat. Res.* 2004. No. 162. Pp. 390-396.
36. Cohen, B.L. Relationship between exposure to radon and various types of cancer. *Health Phys.* 1993. No. 5 (65). Pp. 529-531.
37. Abd El-Zaher, M. Seasonal variation of indoor radon concentration in dwellings of Alexandria city, Egypt. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 143(1). Pp. 56-62.
38. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol 1: Sources: United Nations. New York, 2000. 102 p.
39. Сидельникова, О.П. Естественные радионуклиды в строительных материалах и отходах промышленности Волгоградской области / О.П. Сидельникова // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Сер. Строительство и архитектура. - 2016. - Вып. 44 (63), ч. 2. - С. 52-60.
40. Козлов, Ю.Д. Перспективные технологии строительных материалов для строительной индустрии / Ю.Д. Козлов, О.П. Сидельникова // Вестник

Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Строительство и архитектура. - 2016. - № 43. - С. 86-92.

41. Яковлева, В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: монография / В.С. Яковлева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 174 с.

42. Химическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. Н.Ф. Зефирова. – М.: Советская энциклопедия, 1995. – Т. 4. – 639 с.

43. ICRP Publication 50: Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. *Annals ICRP*. 1987. No. 17(1). Pp. 64 – 67.

44. Kávási, N., Kobayashi, Y., Kovács, T., et. Al. Effect of radon measurement methods on dose estimation. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 145 (2-3). Pp. 224 –232.

45. Harley, H.N., Chittaporn, P., Marsicano, A. Residential radon remediation: performance over 17 years. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 145(2-3). Pp. 194 – 197.

46. Chen, J., Moir, D., Pronk, T., et. Al. An update on thoron exposure in Canada with simultaneous ^{222}Rn and ^{220}Rn measurements in Fredericton and Halifax. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 147(4). Pp. 541 – 547.

47. Ижевский, П.В. Канцерогенная опасность радона // Информ. Бюллетень «Первичная профилактика рака», 2006. – № 2 (4). С. 1-4.

48. Тихонов, М.Н. Радоновая опасность: источники, дозы и нерешенные вопросы / М.Н. Тихонов. – М.: ВИНТИ, 2008. – Вып.3. – С. 29-51. – (Обзорная информация / Экол. Экспертиза).

49. Marsh J.W., Birchall A. Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* 2002. No. 87. Pp. 167 – 178.

50. UNSCEAR, 1982: Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Annexes. New York, 1982. 115 p.

51. Сидельникова, О.П. Экологические аспекты строительной отрасли / О.П. Сидельникова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. - 2013. - № 32. - С. 229-233.

52. Жуковский, М.В. Радон: история и современность // Вестник УрО РАН. – 2010. – № 1(31). – С. 27-38.

53. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): (Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 2612-10): зарегистрирован 11 августа 2010 г. Регистрационный № 18115 – М.: Минюст России, 2010. – 98 с.

54. Сидельникова, О.П. Эффективная удельная активность природных радионуклидов в строительных материалах Волгоградской области [Электронный ресурс] / О.П. Сидельникова, Ю.Д. Козлов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая. - 2013. - Вып. 2 (27). - Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.

55. Сидельникова, О.П. Необходимость сертификации и контроля объектов строительной индустрии по радиационному признаку / О.П. Сидельникова // Альтернативная энергетика и экология. - 2013. - № 12. - С. 51-54.

56. Яковлева, В.С. Процессы переноса радона в неравновесных средах : автореф. Дис. На соискание ученой степени канд. физ.-мат. Наук: 01.04.01 / В.С. Яковлева; Томский политехнический университет. – Томск, 2002. – 16 с.

57. Chen, J., Moir, D., MacLellan, K., et. Al. Soil radon measurements in the Canadian cities. *Radiat. Prot. Dosim.* 2012. No. 151(1). Pp. 172 – 174.

58. Уткин, В.И. Газовое дыхание земли // Сорос. Образоват. Журн. – 1997. – № 1. – С. 61-64.

59. Радоновая безопасность зданий / М.В. Жуковский [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 113 с.

60. Froňka, A. Indoor and soil gas radon simultaneous measurements for the purpose of detail analysis of radon entry pathways into houses. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 145(2 – 3). Pp. 117 – 122.

61. Louro, A., Peralta, L., Soares, S., et. Al. Human exposure to indoor radon: a survey in the region of Guarda, Portugal. *Radiation Protection Dosimetry.* 2013. No. 154(2). Pp. 237 – 244.

62. Quarto, M., Pugliese, M., Loffredo, F., Roca, V. Indoor radon concentration measurements in some dwellings of the Penisola Sorrentina, South Italy. *Radiat. Prot. Dosim.* 2013. No. 156(2). Pp. 207 – 212.
63. Rafique, M., Rahman, S., Rahman, S.U., et. Al. Indoor radon concentration measurement in the dwellings of district Poonch (Azad Kashmir), Pakistan. *Radiat. Prot. Dosim.* 2010. No. 138(2). Pp. 158 – 165.
64. Rani, A., Singh, S., Dugga, V. Indoor radon measurements in the dwellings of Punjab and Himachal Pradesh, India. *Radiat. Prot. Dosim.* 2013. No. 156(1). Pp. 118 – 124.
65. Rakesh Chand Ramola. Survey of radon and thoron in homes of Indian Himalay. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 146(1-3). Pp. 11 – 13.
66. Obed, R.I., Ademola A.K., Ogundare, F.O. Radon measurements by nuclear track detectors in dwellings in Oke-Ogun area, South-Western, Nigeria. *Radiat. Prot. Dosim.* 2012. No. 148(4). Pp. 475-481.
67. Karadeniz, Ö., Yaprak, G., Akal, C., Emen, I. Indoor radon measurements in the granodiorite area of Bergama. *Radiat. Prot. Dosim.* 2012. No. 149(2). Pp. 147 – 154.
68. Chen, J., Schroth, E., MacKinlay, E., et. Al. Simultaneous ^{222}Rn and ^{220}Rn measurements in Winnipeg, Canada. *Radiat. Prot. Dosim.* 2009. No. 134(2). Pp. 75 – 78.
69. Kávási, N., Kobayashi, Y., Kovács, T., et. Al. Effect of radon measurement methods on dose estimation. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 145 (2-3). Pp. 224-232.
70. Kim, Y., Chang, B.-U., Park, H.-M., et. Al. National radon survey in Korea. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 146(1-3). Pp. 6 – 10.
71. Thinova, L., Rovenska, K. Radon dose calculation methodology for underground workers in the Czech Republic. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 145(2-3). Pp. 233 – 237.
72. Çile, S., Altınsoy, N., Çelebi, N. Radon concentrations in three underground lignite mines in Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.* 2010. No. 138(1). Pp. 78 – 82.

73. Poulin, P., Leclerc, J.-M., Dessau, J.-C., et. Al. Radon measurement in schools located in three priority investigation areas in the province of Quebec, Canada. *Radiat. Prot. Dosim.* 2012. No. 151(2). Pp. 278 – 289.

74. Rafique, M., Rahman, S.U., Rahman, S., et. Al. Assessment of indoor radon doses received by the students in the Azad Kashmir schools, Pakistan. *Radiat. Prot. Dosim.* 2010. No. 142(2-4). Pp. 339 – 346.

75. Clouvas, A., Takoudis, G., Xanthos, S., et. Al. Indoor radon measurements in areas of northern Greece with relatively high indoor radon concentrations. *Radiat. Prot. Dosim.* 2009. No. 136(2). Pp. 127 – 131.

76. Makelainen, I., Moisio, S., Reisbacka, S. and Turtiainen. H. Indoor occupancy and radon exposure in Finland. In: *Radioactivity in the Environment, Volume 7. Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment, Rhodes, Greece, 20 – 24 May 2002.* Pp. 687 – 693.

77. Whicker, J.J., McNaughton, M.W. Work to save dose: contrasting effective dose rates from radon exposure in workplaces and residences against the backdrop of public and occupational regulatory limits. *Health Phys.* 2009. No. 97(3). Pp. 248 – 256.

78. Espinosa, G., Golzarri, J.I., Angeles, A., Griffith, R.V. Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using nuclear track methodology. *Rad. Measur.* 2009. No. 44. Pp. 1051 – 1054.

79. Oikawa, S., Kanno, N., Sanada, T., Abukawa, J., Higuchi, H. A. Survey of indoor workplace radon concentration in Japan. *Int. Environ. Rad.* 2006. No. 87. Pp. 239 – 245.

80. Bucci, S., Pratesi, G., Viti, M.L., et. Al. Radon in workplaces: first results of an extensive survey and comparison with radon in homes. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011. No. 145(2-3). Pp. 202 – 205.

81. Световидов, А.В. Опыт проведения радонозащитных мероприятий в эксплуатируемых зданиях / А.В. Световидов, В.А. Венков, Г.А. Горский // *Радиационная гигиена*, 2009. Т. 2, № 4. С. 35-39.

82. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информационный сборник. – СПб., 2013. – 67 с.

83. Микляев, П.С. Опыт применения изотопного геохимического метода для исследования условий переноса радона к дневной поверхности / П.С. Микляев, Т.Б. Петрова, А.А. Цапалов, А.П. Борисов // АНРИ, 2012. № . С. 15-20.

84. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. – 116 с.

85. Павленко, Т.А. Існуючі дози опромінення населення України / Павленко Т.А., Лось І.П. // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. – Вип. 1, Т.12. – С. 18–22.

86. Рогалис, В.С. Подход к оценке уровня природного облучения в помещениях эксплуатируемых зданий (на примере г. Москвы) / В.С. Рогалис, О.Г. Польский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 1. С. 247-251.

87. Ненахова, Е.В. Радон и здоровье населения / Е.В. Ненахова, О.А. Макаров // Бюллетень , 2006, ВСНЦ СО РАМН, № 6 (52). С. 184-185.

88. Боев, В.М. Содержание радона в почве и воздушной среде селитебных зон г. Оренбурга / В.М. Боев, А.П. Воробьев, В.Н. Дунаев // Вестник ОГУ, 2005. № 5. С. 65-67.

89. Пархоменко, В.И. Радиационная обстановка в Брянской области / В.И. Пархоменко, Н.Ф. Пискунов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2013. № 3. С. 66-72.

90. Nero, A.V.; Nazaroff, W.W. Characterizing The Source of Radon Indoors. Radiation Protection Dosimetry, 4: 23: 1984.

91. Nazaroff. W.W.; Moed, B.A.; Sextro, R.G. Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Mitigation and Entry, In: Radon and its Decay Products in Indoor Airn. Nazaroff, W.W.; Nero, A.V. eds., John Wiley & Sons, New York. 57-112: 1988.

92. Cramer, R.; Brunner, H.H.; Buchli, R.; Wernli, C.; Burkart, W. Indoor Rn Levels in Different Geological Areas in Switzerland, Health Physics, 57:29-38: 1989.

93. A.J. Gadgil. Models of radon entry. Radiation Protection Dosimetry. Vol. 45, No. 1/4, pp. 373–380 (1992).

94. Zapalac, G.H. (1983) A time-dependent method for characterizing the diffusion of Radon-222 in concrete”, *Health Physics*, 45(2), 377-283.
95. B.P. Jelle. Development of a model for radon concentration in indoor air (Разработка модели накопления радона в воздухе помещений). *Science of the Total Environment*, No. 416 (2012). Pp. 343–350.
96. Nazaroff W.W. Radon transport from soil to air. *Rev Geophys* 1992; 30: 137–60.
97. Ярмошенко, И.В. Моделирование поступления радона в жилища / И.В. Ярмошенко, М.В. Жуковский, А.А. Екидин // АНРИ, 1999. - № 4. С. 17-28.
98. Sherman M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998 г. LBL-31305.
99. Scott, A.G. Modeling radon sources and ingress. The 1993 International Radon Conference. September 20-22, Denver, Colorado. IV 66-74.
100. Tanner, A.B. Radon migration in the ground: A review. *Natural Radiation Environment*, 1964. P. 161.
101. Currie, J.A. Gaseous diffusion in porous media. Part 3 – Wet granular materials. *Br. J. Appl. Phys.*, 1961. 12, 275.
102. Moed B.A., Nazaroff, W.W., Nero, A.V., et all. Identifying areas with potential for high indoor radon level. Report LBL 16955. Berkley, CA, 1984. 176 p.
103. Kirkegaard, P., Lovborg L. Transport of terrestrial gamma radiation in plane semi-infinite geometry. *J. Comp. Phys.*, 1980. 36. 20.
104. Busigin, A.; Van Der Vooren. A.; Phillips, C. Interpretation of the response of continuous radon monitors to transient radon concentrations. *Health Physics*. 37:659-667; 1979.
105. Carlisle, D.; Azzouz, H. Geological parameters in radon risk assessment-a case history of deliberate exploration. The 1991 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, Philadelphia, Pennsylvania, Vol. 5; 1991.
106. Colic, R.; Rubin, R.J.; Knab, L.I.; Hutchinson, J.M.R. Radon transport through and exhalation from building materials: a review and assessment. National Bureau ofstandards Technical Note 1139; 1981.

107. Countess, R.J.; Thomas, J.W. Radon flask monitor. Health and Safety Laboratory and Development Administration; HASL-330; August 1977.
108. Culot. M.V.J.; Olson, H.G.; Schiager, K.J. Effective diffusion coefficient of radon in concrete. Health Physics 30:263-270; 1976.
109. Dimbylow, P.J. The solution of the pressure driven flow equation for radon ingress through cracks in concrete foundations. Radiation Protection Dosimetry 18:163-167; 1987.
110. Dullien, F. Porous media fluid transport and pore structure. New York: Academic Press; 1979.
111. Folkerts, K.H.; Keller, G.; Muth, H. Experimental investigations on diffusion and exhalation of ^{222}Rn and ^{220}Rn from building materials. Radiation Protection Dosimetry 7:4 1-44; 1981.
112. McKelvey, W., Davis, J. Radon resistance under pressure. The 1991 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, Philadelphia, Pennsylvania: Vol. 3; 1991.
113. Васильев, А.В. Проблема облучения радоном в современных многоэтажных зданиях // Строительство и реконструкция, 2014. – № 4 (54). – С. 37-44.
114. Сахаров, В.К. Радиоэкология: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 320 с :
115. Гулабянц, Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. – М: НО «ФОН-НАУКА», 2013. – 52 с.
116. Olsson-Jonsson A. Radon transmittance and permeability of Flexigum // Report P603728, 2006-10-04. Boras: SP Swedish National Testing and Research Institute, 2006.
117. Гулабянц, Л.А. Метод расчета требуемого сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций зданий. АНРИ № 4 (67), 2011. С. 26-32.
118. Гулабянц, Л.А. Принцип построения новых норм проектирования противорадоновой защиты зданий // Академия. Строительные науки, 2009. – № 5. – С. 461-467.

119. Гулабянц, Л.А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона // Вестник МГСУ, 2011. – № 3. – С. 3-8.

120. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина). – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

121. L. Minkin. Is diffusion, thermodiffusion, or advection a primary mechanism of indoor radon entry? Radiation Protection Dosimetry. Vol. 102, No. 2, pp. 153–162 (2002)

122. L. Minkin. Thermal diffusion of radon in porous media / Radiation Protection Dosimetry. Vol. 106, No. 3, pp. 267–272 (2003).

123. L. Minkin, A.S. Shapovalov. Indoor radon entry: 30 years later. Iran. J. Radiat. Res., 2008; 6 (1): 1-6.

124. Telford, W.M. Radon mapping in the search for uranium. In: A.A. Fitch (Editor), Developments in Geophysical Exploration Methods, 1983. Vol. 4 Elsevier, Barking, pp. 155-194.

125. Беленсов, П.Е. Метод определения скорости выделения радона и скорости воздухообмена в помещениях / П.Е. Беленсов, П.И. Кузнецов // АНРИ, 1996. – № 1. – С. 23-25.

126. Жуковский, М.В. Определение механизмов и параметров поступления радона в помещения / М.В. Жуковский, А.В. Васильев // АНРИ, 2012. – № 1 (68). – С. 3-12.

127. Васильев, А.В. Изменение кратности воздухообмена как мера снижения облучения населения радоном в городских жилищах, построенных с использованием современных технологий / А.В. Васильев, И.В. Ярмошенко, М.В. Жуковский // АНРИ, 2014. – № 3 (78). – С. 13-21.

128. Павлов, И.В. Математическая модель процесса эксгаляции радона с поверхности земли и критерии оценки потенциальной радоноопасности территории застройки // АНРИ, 1996/97. – № 5. – С. 15-26.

129. Гулабянц, Л.А. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания / Л.А. Гулабянц, М.И. Лившиц, С.В. Медведев // Академия. Строительные науки, 2016. – № 1. – С. 122-128.

130. Гулабянц, Л.А. Математическое моделирование поля концентрации радона в окрестности подземной части здания / Л.А. Гулабянц, М.И. Лившиц // АНРИ, 2014. – № 1 (86). – С. 22-28.

131. Климшин, А.В. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона / А.В. Климшин, И.А. Козлова, Е.Н. Рыбаков, М.Ю. Луковской // вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2010. № 2. выпуск № 16. С. 146-151.

132. Лившиц, М.И. Математическое решение краевой задачи переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» / М.И. Лившиц, Л.А. Гулабянц // Сборник научных трудов РААСН – 2017. Том 2. С. 218-225.

133. Scott, A.G. The distribution of average radon daughter concentrations in houses estimated from single-sample surveys. Health Phys.45: 435-438; 1983.

134. M. Jiranek, Z. Svoboda. Numerical modelling as a tool for optimisation of sub-slab depressurisation systems design (Численное моделирование как средство оптимизации пассивных систем защиты от радона). Building and Environment, 42 (2007). Pp. 1994 –2003.

135. Nazaroff, W.W., Nero, A.V.. Radon and its Decay Products in Indoor Air. New York: John Wiley and Sons, 1988. – 256 p.

136. Nazaroff, W.W., Sextro, R.G., 1989. Technique for measuring the indoor ^{222}Rn source potential of soil. Environ. Sci. Technol., 23 (4): 451.

137. Mowris, R.J., Fisk, W.J. Modeling the Effects of Exhaust Ventilation on ^{222}Rn Entry Rates and Indoor ^{222}Rn Concentrations. Health Phys. 54,491-501 (1988).

138. Loureiro, C. O. Simulation of the Steady State Transport of Radon from Soil into Houses with Basements under Constant Negative Pressure. Report LBL-24378 (Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA) (1987).

139. Loureiro, C. O., Abriola, L. M., Martin, J. E, and Sextro, R, G. Three Dimensional Simulation of Radon Transport into Houses Under Constant Negative Pressure. Environ. Sci. Technol. 24, 1338-1348 (1990).

140. Loureiro, C. de O., Abriola, L.M., Martin, J.E. and Sextro, R.G., 1990. Three-dimensional simulation of radon transport into houses with basements under constant negative pressure. *Environ. Sci. Technol.*, 24: 1338-1348.

141. Reddy, T. A., Black, H. E., HI, Gadsby, K. J., Harrje, D. T. and Sextro, R. G. Modeling Air Flow Dynamics through a Homogeneous Gravel Porous Bed using Subslab Depressurization. Report PU/CEES 246 (Princeton University, Center for Energy and Environmental Studies Princeton, NJ (1990).

142. Gadsby, K. J., Reddy, T. A., de Silva, R. and Hanje, D. T. A Simplified Modeling Approach and Field Verification of Airflow Dynamics in SSD Radon Mitigation Systems. Proceeding of the 1990 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, U.S. Environmental Protection Agency Report No. EPA-600/9-9 L-026b, Washington D.C., 1991. Available as NTIS report PB91-234450, Springfield, VA (1991). Pages 5-1 to 5-20.

143. Gadsby, K. J., Reddy, T. A. and Craig, A. B. The Effect of Subslab Aggregate Size on Pressure Field Extensions. Proceedings 1991 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, (U.S. Environmental Protection Agency, Report EPA-600/9-91-037h, Washington D.C., 1991 pages 8-65 to 8-82. Available as NTIS report PB92-115369, Springfield, VA (1992).

144. Hintenlang, D. E. and Furman, R, A, Sub-slab Suction System Design for Low Permeability Soils. Proceedings of 1990 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, U.S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/9-91-026c, Washington D.C., 1991. Available as NTIS report PB91-234468, Springfield, VA (1991). Pp. 5.1-5.14.

145. Narasirhan, T. N., Tsang. Y. W. and Holman, H-Y. On the Potential Importance of Transient Air Flow in Advective Radon Entry into Buildings. *Geophys. Res. Lett.* 17, 821-824 (1990).

146. Revzan, K. L., Fisk, W. J. and Gadgil, A. J. Modeling Radon Entry into Houses with Basements. Model Description and Verification. *Indoor Air* 1(2). 173-189 (1991).

147. Revzan, K. L. and Fisk, W. J. Modeling Radon Entry into Houses with

Basements: the Influence of Structural Factors. *Indoor Air*, Vol. 2, No. 1, pp 40-48, (1992).

148. Revzan, K. L., Fisk, W. J. and Sextro, R. G. Modeling Radon Entry into Houses with Concrete Block Stem-walls. Report LBL-30005 (Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA) (1991).

149. Rogers, V. C.; Neilson, K. K. Multiphase radon generation and transport in porous materials. *Health Phys.* 60:807-815; 1991.

150. Rogers, V. C.; Neilson, K. K. Correlations for predicting air permeabilities and diffusion coefficients of soils. *Health Phys.* 61:225-230; 1991.

151. Arvela H. Seasonal variation in radon concentration of 3000 dwellings with model comparison. *Radiation Protection Dosimetry*, 1995. V. 59. P.33-42.

152. Sherman, M., Grimstrud, D.T. Measurement on infiltration using fan pressurization and weather data. LBL-10852, 1980.

153. Sherman, M. The use of blower-door data. LBL-35173, 1998.

154. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly. New York: UN, 1993.

155. K.K. Al-Ahmady, D.E. Hintenlang. Assessment of temperature-driven pressure differences with regard to radon entry and indoor radon concentration. Proceedings of the 1994 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology. Atlantic City, NJ, 1994. III - 6.1-6.11.

156. Бухарев, А.Ю. О возможности прогнозирования накопления радона в воздухе помещений на основе моделирования процессов воздухообмена в здании / А.Ю. Бухарев, С.Г. Головнев, Н.М. Андреев и др. // АНРИ, 1999. – № 3. – С. 43-46.

157. T. Kohl, F. Medici, L. Rybach. Numerical simulation of radon transport from subsurface to buildings (Численное моделирование переноса радона из грунтового основания в здания), *Journal of Applied Geophysics*, No. 31 (1994). Pp. 145-152.

158. Medici, F.V., 1992. Zusammenh~inge zwischen lokaler Geologie und Radon-Konzentrationen in Wohnh~usern, Erste Ergebnisse aus der Schweiz. Ph.D.

Thesis. ETH Zurich, Nr. 9931, Zurich.

159. Medici, F. and Rybach, L., 1994. Measurements of indoor radon concentrations and assessment of radiation exposure. *J. Appl. Geophys.*, 31: 153-163.

160. C.E. Andersen, J. Sogaard-Hansen, B. Majborn. Soil gas and radon entry into a simple test structure: Comparison of experimental and modeling results. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 56, pp. 151-155 (1994).

161. Fan Wang, Ian C. Ward. Radon entry, migration and reduction in houses with cellars. *Building and Environment*, Vol. 37, (2002). Pp. 1153-1165.

162. Fan Wang, I.C. Ward. Modeling Multiple Radon Entry and Transport in a Domestic Dwellings // *Building and Environment*, 1997. – Vol. 32, No. 4, pp. 341-350.

163. Fan Wang, Ian C. Ward. The development of a radon entry model for a house with a cellar. *Building and Environment*, No. 35, (2000). Pp. 615–631.

164. Cavallo. A., Gadsby, K. and Reddy, T. A.. Use of natural basement ventilation to control radon in single family dwellings. *Atmospheric Environment*. 1992, 26A(12), 2251-2256.

165. Федеральный закон Российской Федерации «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996 г.

166. Федеральный закон Российской Федерации «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» № 384-ФЗ от 30.12.1999 г.

167. Бакаева, Н.В. Методы и средства защиты от радона эксплуатируемых зданий и сооружений / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2017. - № 2 (46). – С. 105-113.

168. Калайдо, А.В. Оценка облучения радоном в эксплуатируемых многоэтажных зданиях / А.В. Калайдо // *Строительство и реконструкция*.– № 5 (61). – 2015. – С. 56-62.

169. Бакаева, Н.В. Экспериментальные исследования факторов, формирующих радиационный фон зданий / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. – № 4 (12). – 2015. – С. 21-27.

170. Бакаева, Н.В. Исследования механизмов поступления радона в здания и эффективности защитных мероприятий / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Известия Юго-Западного государственного университета. – № 2 (65). – 2016. – С. 33-38.

171. Бакаева, Н.В. Радиационные аспекты экологической безопасности городской застройки / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Материалы 4-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах», посвященной 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2015. – Т. 2. С. 10-16.

172. Бакаева, Н.В. Оценка вклада излучения строительных материалов в величину годовой дозы облучения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Сборник статей VIII-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда» – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2016. – Т. 1. – С. 75-79.

173. Гулабянц, Л.А. Математическая модель формирования радоновой обстановки в здании / Л.А. Гулабянц, А.В. Калайдо, М.И. Лившиц // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). – 2017. – № 2 (53). – С. 41-49.

174. Бакаева, Н.В. Условия диффузионного поступления радона в здания и сооружения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Современная наука и инновации. – 2017. - № 2 (18). – С. 163-167.

175. Бакаева, Н.В. Механизмы поступления радона в здания и сооружения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Строительство и реконструкция. – № 5 (67). – 2016. – С. 51-59.

176. Бакаева, Н.В. Математическая модель поступления радона в здания и сооружения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Экология урбанизированных территорий. – 2017. - № 1. – С. 69-73.

177. Bakaeva N.V., Kalaydo A.V. Prediction of radon concentrations in above-ground apartments // International Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, art. 442. Pp. 280 – 286. DOI:10.5937/jaes15-14656.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Результаты гамма-спектрометрического исследования грунта с территории «Ясли-садик комбинированного типа № 55»

Дата изм.	Время	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40
<i>Первая проба</i>					
13.01.2017	15:32	28,5 ± 6,4	32,9 ± 7,8	2,1 ± 2,1	294,2 ± 74,7
17.01.2017	14:25	35,4 ± 6,8	26,0 ± 6,6	0,1 ± 1,9	308,1 ± 75,2
20.01.2017	15:08	32,1 ± 6,5	31,8 ± 7,3	0,6 ± 1,9	313,7 ± 76,4
23.01.2017	13:20	34,8 ± 6,8	30,0 ± 7,0	2,3 ± 2,1	299,0 ± 73,0
27.01.2017	14:53	33,2 ± 6,6	27,2 ± 6,7	0,9 ± 1,8	293,0 ± 72,3
31.01.2017	12:35	33,0 ± 6,6	31,6 ± 7,2	1,3 ± 1,8	313,4 ± 74,7
14.02.2017	14:32	30,0 ± 6,2	27,5 ± 6,8	0,7 ± 1,8	273,6 ± 74,7
21.02.2017	15:36	35,3 ± 6,8	30,3 ± 7,1	0,1 ± 1,9	294,2 ± 74,7
<i>Вторая проба</i>					
13.01.2017	16:14	31,6 ± 6,7	30,0 ± 6,7	0,3 ± 2,1	297,4 ± 74,8
17.01.2017	14:59	31,8 ± 6,5	28,4 ± 6,5	0,3 ± 1,8	307,9 ± 75,1
20.01.2017	15:41	36,3 ± 6,9	26,1 ± 6,7	0,1 ± 1,9	291,3 ± 72,5
23.01.2017	14:02	34,2 ± 6,7	32,4 ± 7,3	0,2 ± 1,9	285,0 ± 71,4
27.01.2017	15:54	34,2 ± 6,7	31,2 ± 7,2	0,5 ± 1,9	333,1 ± 79,3
31.01.2017	13:11	32,7 ± 6,5	28,3 ± 6,8	0,9 ± 1,9	299,0 ± 73,0
14.02.2017	15:53	30,4 ± 6,3	28,3 ± 6,9	0,2 ± 1,9	332,0 ± 77,6
21.02.2017	16:09	34,2 ± 6,7	31,3 ± 6,7	1,3 ± 2,0	324,0 ± 78,0
<i>Третья проба</i>					
13.01.2017	16:48	31,0 ± 6,6	28,7 ± 7,3	0,3 ± 2,1	300,0 ± 75,7
17.01.2017	15:38	33,0 ± 6,6	32,0 ± 6,6	0,8 ± 1,9	293,0 ± 73,0
20.01.2017	16:19	32,1 ± 6,5	32,5 ± 7,4	3,0 ± 2,2	320,0 ± 77,3
23.01.2017	15:50	34,4 ± 6,7	29,3 ± 7,0	1,0 ± 1,8	311,3 ± 75,4
27.01.2017	16:33	36,0 ± 6,9	32,0 ± 7,3	1,5 ± 2,0	327,8 ± 78,6
31.01.2017	13:44	34,0 ± 6,7	29,0 ± 6,9	0,4 ± 1,9	298,2 ± 73,1
14.02.2017	16:42	32,1 ± 6,5	30,0 ± 6,5	0,1 ± 1,9	291,0 ± 72,3
21.02.2017	16:51	35,5 ± 6,9	33,8 ± 7,5	1,1 ± 1,9	319,7 ± 77,5

Приложение Б – Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры

Температура воздуха, °С	Динамическая вязкость воздуха, Па·с	Кинематическая вязкость воздуха, м²/с
-20	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$
5	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$
10	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$
15	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$
20	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$
25	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$
30	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$
40	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$
50	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$
60	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$
70	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
80	$2,07 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-5}$
90	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-5}$
100	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$

Приложение В – Длина и эффективный коэффициент диффузии радона в различных средах

Среда	Длина диффузии L, м	Эффективный коэффициент диффузии $D_{эфф}$, м²/с
Воздух*	2,18	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Вода*	0,022	$1 \cdot 10^{-9}$
Сезонные ленточные глины в природных условиях	0,56 ÷ 0,60	$(0,65 \div 0,75) 10^{-6}$
Суглинки в природных условиях	0,69 ÷ 1,20	$(1,0 \div 3,0) 10^{-6}$
Глинистый песок утрамбованный	1,11	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Суглинок (влажность 5,7%, пористость 0,408)	1,13	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Сухой кварцевый песок	1,46 ÷ 1,76	$(4,5 \div 6,5) 10^{-6}$
Щебенистые элювиально-делювиальные отложения в природных условиях	1,46	$4,5 \cdot 10^{-6}$
Делювиальные, слегка влажные отложения в природных условиях	1,83	$7 \cdot 10^{-6}$

* - приводятся значения чистого коэффициента диффузии D , м²/с.

*Приложение Г – Математическая модель переноса радона в системе сред
«грунт-атмосфера-здание»*

```

> restart;
m:=8;p:=evalf(Pi);

# 1. ДАННЫЕ УСЛОВИЯ
h:=8.0;d:=6;
Hx:=12;Hy:=16;qH:=0;
D1:=7*10^(-6);D2:=7*10^(-6);k:=1;
a1:=k/D1;a2:=k/D2;k1:=a1/a2;
l1:=2.1*10^(-6)/D1;l2:=2.1*10^(-6)/D2;
w1[0]:=sqrt(l1);w2[0]:=sqrt(l2);
C1:=40;re1:=2000;ke1:=0.4;
C2:=40;re2:=2000;ke2:=0.4;
W1:=evalf(C1*re1*ke1*l1);
W2:=evalf(C2*re2*ke2*l2);

# 2. ВИД ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ КАЖДОЙ ОБЛАСТИ СИСТЕМЫ
for n from 1 to m+1 do u11y[n]:=fsolve(tan(zy[n]*h)-a1/zy[n],zy[n],Pi*(n-
1)/h..Pi*(2*n-1)/h/2)od;
for n from 1 to m+1 do v11y[n]:=evalf(sqrt(l1+u11y[n]^2))od;
for n from 0 to m+1 do u11x[n]:=p*(n)/d od;
for n from 0 to m+1 do v11x[n]:=evalf(sqrt(l1+u11x[n]^2))od;
for n from 1 to m+1 do g11y[n]:=eval(cos(u11y[n]*(y-h)))od;
for n from 0 to m+1 do g11x[n]:=eval(cos(u11x[n]*(x)))od;
for n from 0 to m+1 do E11x[n]:=(a1+v11x[n])/(a1-v11x[n])*exp(v11x[n]*y)-exp(-
v11x[n]*y)od;
for n from 1 to m+1 do E11y[n]:=exp(v11y[n]*(x))+exp(-v11y[n]*(x))od;
A11:=W1/l1*(1-a1/(a1+w1[0])*exp(-
w1[0]*y))+sum('sy[i]*E11y[i]*g11y[i]',i=1..m)+sum('sx[i]*E11x[i]*g11x[i]',i=0..m);

```

```

for n from 1 to m do u21y[n]:=fsolve(tan(zy[n]*h)-a2/zy[n],zy[n],Pi*(n-1)/h..Pi*(2*n-
1)/h/2)od;
for n from 1 to m do v21y[n]:=evalf(sqrt(l2+u21y[n]^2))od;
for n from 0 to m do u21x[n]:=p*(n)/(Hx-d) od;
for n from 0 to m do v21x[n]:=evalf(sqrt(l2+u21x[n]^2))od;
for n from 1 to m do g21y[n]:=eval(cos(u21y[n]*(y-h)))od;
for n from 0 to m do g21x[n]:=eval(cos(u21x[n]*(x-Hx)))od;
for n from 0 to m do E21x[n]:=(a2+v21x[n])/(a2-v21x[n])*exp(v21x[n]*y)-exp(-
v21x[n]*y)od;
for n from 1 to m do E21y[n]:=exp(v21y[n]*(Hx-x))+exp(-v21y[n]*(Hx-x))od;
A21:=W2/l2*(1-a2/(a2+w2[0])*exp(-w2[0]*y))+sum('qy[i]*E21y[i]*g21y[i]',
'i'=1..m)+sum('qx[i]*E21x[i]*g21x[i]', 'i'=0..m);
for n from 0 to m do u12x[n]:=evalf(p*n/(d))od;
for n from 0 to m do v12x[n]:=evalf(sqrt(l2+u12x[n]^2))od;
for n from 0 to m do u12y[n]:=evalf(p*(n)/(Hy-h))od;
for n from 0 to m do v12y[n]:=evalf(sqrt(l2+u12y[n]^2))od;
for n from 0 to m do g12y[n]:=eval(cos(u12y[n]*(y-Hy)))od;
for n from 0 to m do g12x[n]:=eval(cos(u12x[n]*(x)))od;
for n from 0 to m do E12y[n]:=exp(v12y[n]*(x))+exp(-v12y[n]*(x))od;
for n from 0 to m do E12x[n]:=exp(v12x[n]*(Hy-y))+exp(-v12x[n]*(Hy-y))od;
A12:=W2/l2+sum('ty[i]*E12y[i]*g12y[i]', 'i'=0..m)+sum('tx[i]*E12x[i]*g12x[i]',
'i'=0..m);
for n from 0 to m do u22x[n]:=evalf(p*n/(Hx-d))od;
for n from 0 to m do v22x[n]:=evalf(sqrt(l2+u22x[n]^2))od;
for n from 0 to m do u22y[n]:=evalf(p*(n)/(Hy-h))od;
for n from 0 to m do v22y[n]:=evalf(sqrt(l2+u22y[n]^2))od;
for n from 0 to m do g22y[n]:=eval(cos(u22y[n]*(Hy-y)))od;
for n from 0 to m do g22x[n]:=eval(cos(u22x[n]*(Hx-x)))od;
for n from 0 to m do E22y[n]:=exp(v22y[n]*(Hx-x))+exp(-v22y[n]*(Hx-x))od;
for n from 0 to m do E22x[n]:=exp(v22x[n]*(Hy-y))+exp(-v22x[n]*(Hy-y))od;

```

A22:=W2/l2+sum('py[i]*E22y[i]*g22y[i]', 'i'=0..m)+sum('px[i]*E22x[i]*g22x[i]',
'i'=0..m);

3.ВИД ФУНКЦИЙ ПРОФИЛЕЙ И ИХ РОИЗВОДНЫХ ДЛЯ КАЖДОЙ
ОБЛАСТИ СИСТЕМЫ

G11210:=proc(y)eval(A11,x=d)end;

GD11210:=proc(y)eval(diff(A11,x),x=d)end;

G1121:=G11210(y);

GD1121:=GD11210(y);

G21110:=proc(y)eval(A21,x=d)end;

GD21110:=proc(y)eval(diff(A21,x),x=d)end;

G2111:=G21110(y);

GD2111:=GD21110(y);

G11120:=proc(x)eval(A11,y=h)end;

GD11120:=proc(x)eval(diff(A11,y),y=h)end;

G1112:=G11120(x);

GD1112:=GD11120(x);

G21220:=proc(x)eval(A21,y=h)end;

GD21220:=proc(x)eval(diff(A21,y),y=h)end;

G2122:=G21220(x);

GD2122:=GD21220(x);

G12110:=proc(x)eval(A12,y=h)end;

GD12110:=proc(x)eval(diff(A12,y),y=h)end;

G1211:=G12110(x);

GD1211:=GD12110(x);

G22210:=proc(x)eval(A22,y=h)end;

GD22210:=proc(x)eval(diff(A22,y),y=h)end;

G2221:=G22210(x);

GD2221:=GD22210(x);

G12220:=proc(y)eval(A12,x=d)end;

GD12220:=proc(y)eval(diff(A12,x),x=d)end;

G1222:=G12220(y);

GD1222:=GD12220(y);

G22120:=proc(y)eval(A22,x=d)end;

GD22120:=proc(y)eval(diff(A22,x),x=d)end;

G2212:=G22120(y);

GD2212:=GD22120(y);

4. СОГЛАСОВАНИЕ ФУНКЦИЙ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ НА ГРАНИЦАХ ОБЛАСТЕЙ

for n from 1 to m do r1121[n]:=evalf(int(2*G1121*cos(u11y[n]*(y)),y=0..h))od;

for n from 1 to m do r2111[n]:=evalf(int(2*G2111*cos(u21y[n]*(y)),y=0..h))od;

for n from 1 to m do R1121[n]:=r1121[n]-r2111[n]od;

for n from 1 to m do rd1121[n]:=evalf(int(2*GD1121*cos(u11y[n]*(y)),y=0..h))od;

for n from 1 to m do rd2111[n]:=evalf(int(2*GD2111*cos(u21y[n]*(y)),y=0..h))od;

for n from 1 to m do RD1121[n]:=k1*rd2111[n]-rd1121[n]od;

for n from 0 to m do r1211[n]:=evalf(int(2*G1211*cos(p*n*x/d),x=0..d))od;

for n from 0 to m do r1112[n]:=evalf(int(2*G1112*cos(p*n*x/d),x=0..d))od;

for n from 0 to m do R1211[n]:=r1211[n]-r1112[n]od;

for n from 0 to m do rd1211[n]:=evalf(int(2*GD1211*cos(p*n*x/d),x=0..d))od;

for n from 0 to m do rd1112[n]:=evalf(int(2*GD1112*cos(p*n*x/d),x=0..d))od;

for n from 0 to m do RD1211[n]:=k1*rd1211[n]-rd1112[n]od;

for n from 0 to m do r2122[n]:=evalf(int(2*G2122*cos(p*n*(x-Hx)/(Hx-d)),x=d..Hx))od;

for n from 0 to m do r2221[n]:=evalf(int(2*G2221*cos(p*n*(x-Hx)/(Hx-d)),x=d..Hx))od;

for n from 0 to m do R2122[n]:=r2122[n]-r2221[n]od;

for n from 0 to m do rd2122[n]:=evalf(int(2*GD2122*cos(p*n*(x-Hx)/(Hx-d)),x=d..Hx))od;

for n from 0 to m do rd2221[n]:=evalf(int(2*GD2221*cos(p*n*(x-Hx)/(Hx-d)),x=d..Hx))od;

for n from 0 to m do RD2122[n]:=rd2122[n]-rd2221[n]od;

```
for n from 0 to m do r1222[n]:=evalf(int(2*G1222*cos(p*n*(y-Hy)/(Hy-h)),y=h..Hy))od;
```

```
for n from 0 to m do r2212[n]:=evalf(int(2*G2212*cos(p*n*(y-Hy)/(Hy-h)),y=h..Hy))od;
```

```
for n from 0 to m do R1222[n]:=r1222[n]-r2212[n]od;
```

```
for n from 0 to m do rd1222[n]:=evalf(int(2*GD1222*cos(p*n*(y-Hy)/(Hy-h)),y=h..Hy))od;
```

```
for n from 0 to m do rd2212[n]:=evalf(int(2*GD2212*cos(p*n*(y-Hy)/(Hy-h)),y=h..Hy))od;
```

```
for n from 0 to m do RD1222[n]:=rd1222[n]-rd2212[n]od;
```

5.ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ВЬРАЖЕНИЯХ ДЛЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ A11, A12, A12, A22 В КАЖДОЙ ОБЛАСТИ СИСТЕМЫ

```
W00:={seq(sx[n],n=0..m),seq(qx[n],n=0..m),seq(tx[n],n=0..m),seq(px[n],n=0..m),seq(sy[n],n=1..m),seq(qy[n],n=1..m),seq(ty[n],n=0..m),seq(py[n],n=0..m)};
```

```
W0:={seq(W00[n],n=1..8*m+6)};
```

```
U00:={seq(R1121[n]=0,n=1..m),seq(RD1121[n]=0,n=1..m),seq(R1211[n]=0,n=0..m),seq(RD1211[n]=0,n=0..m),seq(R2122[n]=0,n=0..m),seq(RD2122[n]=0,n=0..m),seq(R1222[n]=0,n=0..m),seq(RD1222[n]=0,n=0..m)};
```

```
U0:={seq(U00[n],n=1..8*m+6)};
```

```
V0:=solve(U0,W0);
```

```
for n from 1 to 8*m+6 do z0[n]:=lhs(V0[n])-rhs(V0[n])od;
```

```
L0 := [seq(n, n=1..8*m+6)];
```

```
Q0:=mul(z0[n],n=L0);
```

```
for n from 0 to m do zsx[n]:=select(has,Q0,sx[n]);
```

```
sx0[n]:=solve(zsx[n],sx[n])od;
```

```
for n from 0 to m do zqx[n]:=select(has,Q0,qx[n]);
```

```
qx0[n]:=solve(zqx[n],qx[n])od;
```

```
for n from 0 to m do ztx[n]:=select(has,Q0,tx[n]);
```

```
tx0[n]:=solve(ztx[n],tx[n])od;
```

```
for n from 0 to m do zpx[n]:=select(has,Q0,px[n]);
```

```

px0[n]:=solve(zpx[n],px[n])od;
for n from 1 to m do zsy[n]:=select(has,Q0,sy[n]);
sy0[n]:=solve(zsy[n],sy[n])od;
for n from 1 to m do zqy[n]:=select(has,Q0,qy[n]);
qy0[n]:=solve(zqy[n],qy[n])od;
for n from 0 to m do zty[n]:=select(has,Q0,ty[n]);
ty0[n]:=solve(zty[n],ty[n])od;
for n from 0 to m do zpy[n]:=select(has,Q0,py[n]);
py0[n]:=solve(zpy[n],py[n])od;

```

6. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ В КАЖДОЙ ОБЛАСТИ СИСТЕМЫ

```

F11:=subs(seq(sx[n]=sx0[n],n=0..m),seq(sy[n]=sy0[n],n=1..m),A11);
F21:=subs(seq(qx[n]=qx0[n],n=0..m),seq(qy[n]=qy0[n],n=1..m),A21);
F12:=subs(seq(tx[n]=tx0[n],n=0..m),seq(ty[n]=ty0[n],n=0..m),A12);
F22:=subs(seq(px[n]=px0[n],n=0..m),seq(py[n]=py0[n],n=0..m),A22);

```

7. ГРАФИЧЕСКИЕ ИЛЛЮСТРАЦИИ

```

with(plots):
# Изолинии Активности в области (11)
#contourplot(F11,x=0..d,y=0..h,grid=[20,20],contours=5);
#contourplot(F21,x=d..Hx,y=0..h,grid=[20,20],contours=5);
IJ11:=contourplot(F11,x=0..d,y=0..h,contours=5);
IJ21:=contourplot(F21,x=d..Hx,y=0..h,contours=5);
IJ12:=contourplot(F12,x=0..d,y=h..Hy,contours=5);
IJ22:=contourplot(F22,x=d..Hx,y=h..Hy,contours=5);
display(IJ11,IJ21,IJ12,IJ22,view=[0..Hx,0..Hy]);
#display(IJ11,IJ21,view=[0..Hx,0..h]);
#display(IJ12,IJ22,view=[0..Hx,h..Hy]);
#contourplot(F11,x=0..d,y=0..h,contours=5);
#contourplot(F21,x=d..Hx,y=0..h,contours=5);
#contourplot(F12,x=0..d,y=h..Hy);

```

```

#contourplot(F22,x=d..Hx,y=h..Hy,filled=true);
GIJ11:=contourplot(F11,x=0..d,y=0..h,contours=5);
GIJ21:=contourplot(F21,x=d..Hx,y=0..h,contours=5);
GIJ12:=contourplot(F12,x=0..d,y=h..Hy,contours=5);
GIJ22:=contourplot(F22,x=d..Hx,y=h..Hy,contours=5);
display(GIJ11,GIJ21,GIJ12,GIJ22,view=[0..Hx,0..Hy]);
#IGIJ11:=contourplot(F11,x=d-0.2..d,y=h-0.2..h,contours=10);
#IGIJ21:=contourplot(F21,x=d..d+0.2,y=h-0.2..h,contours=10);
#IGIJ12:=contourplot(F12,x=d-0.2..d,y=h..h+0.2,contours=10);
#IGIJ22:=contourplot(F22,x=d..d+0.2,y=h..h+0.2,contours=10);
#display(IGIJ11,IGIJ21,IGIJ12,IGIJ22,view=[d-0.2..d+0.2,h-0.2..h+0.2]);
# Профиль Активности по ширине в области (12) на 4-х глубинах
for k from 1 to 81 do F11x[k]:=eval(F11,y=0+h*(k-1)/80)od;
for k from 1 to 81 do P[k]:=plot(F11x[k],x=0..d)od;
for k from 1 to 81 do F12x[k]:=eval(F12,y=h+(Hy-h)*(k-1)/80)od;
for k from 1 to 81 do T[k]:=plot(F12x[k],x=0..d)od;
#for k from 1 to 6 do F21x[k]:=eval(F21,y=0+h*(k-1)/5)od;
#for k from 1 to 6 do Q[k]:=plot(F21x[k],x=d..Hx)od;
#for k from 1 to 6 do F22x[k]:=eval(F22,y=h+(Hy-h)*(k-1)/5)od;
#for k from 1 to 6 do S[k]:=plot(F22x[k],x=d..Hx)od;
#display(seq(P[k],k=1..6),seq(T[k],k=1..6),seq(S[k],k=1..6),seq(Q[k],k=1..6),view=[0..
Hx,0..3.4*10^4]);
display(seq(P[k],k=1..81),seq(T[k],k=1..81),view=[0..d,0..3.4*10^4]);
# Профиль Активности по ширине в области (12) на 4-х глубинах
#for k from 1 to 1 do F12x[k]:=eval(F12,y=h)od;
#for k from 1 to 1 do T[k]:=plot(F12x[k],x=0..d)od;
#for k from 1 to 1 do F22x[k]:=eval(F22,y=h)od;
#for k from 1 to 1 do S[k]:=plot(F22x[k],x=d..Hx)od;
#display(seq(T[k],k=1),seq(S[k],k=1),view=[0..Hx,0..3.4*10^4]);

```

Приложение Д – Справка о внедрении результатов диссертационных исследований в учебный процесс

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

ул. Оборонная, 2, г. Луганск, 91011. Тел./факс: (0642) 59-90-08; e-mail: info_lu@ltsu.org

20.09.2017 № 1/1209
на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»



Первый проректор
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный
университет имени Тараса Шевченко»

Г.А. Сорокина

20 » _____ 2017 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационных исследований в учебный процесс

Настоящая справка составлена об использовании в учебном процессе результатов диссертационного исследования А.В. Калайдо, посвященного обеспечению радоновой безопасности проектируемых и эксплуатируемых зданий.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе студентов Института торговли, обслуживающих технологий и туризма, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Профессиональное обучение» (по отраслям), «Технологическое образование», «Товароведение», «Гостиничное дело», «Туризм» и «Дизайн».

Материалы диссертационного исследования нашли отражение при чтении лекций по дисциплинам: «Основы охраны труда» и «Охрана труда в отрасли». В рамках названных дисциплин, базируясь на полученных результатах, были разработаны модули «Радиационная безопасность жилых и служебных помещений», «Радоновая безопасность помещений образовательных учреждений» и «Радиационный мониторинг городской застройки».

Директор Института торговли,
обслуживающих технологий и туризма

В.О. Зинченко

И.о. заведующего кафедрой БЖД, охраны
труда и гражданской защиты



Е.И. Верех-Белюсова

Приложение Е – Акт о внедрении результатов диссертационных исследований в учебный процесс кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Юго-Западного государственного университета

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Юго-Западного государственного
университета, д.т.н., профессор
О.Г. Локтионова



2017 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации Калайдо Александра Витальевича в учебный процесс кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Юго-Западного государственного университета

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Калайдо Александра Витальевича на тему: «Модельное исследование процесса переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» внедрены в учебный процесс кафедры «Промышленное и гражданское строительство» при изучении дисциплин «Экологическая экспертиза строительных проектов» и «Биосферосовместимые технологии в строительстве», читаемых студентам по направлению подготовки (специальности) 07.03.01 «Архитектура» и 08.03.01 «Строительство»; магистрантам по направлению подготовки (специальности) 07.04.01 «Архитектура» и 08.04.01 «Строительство».

Декан факультета строительства
и архитектуры

 _____ Е.Г. Пахомова

И.о. заведующего кафедрой
промышленного и гражданского
строительства

 _____ А.А. Смorchков

Начальник Учебно-методического
управления

 _____ В.В. Протасов